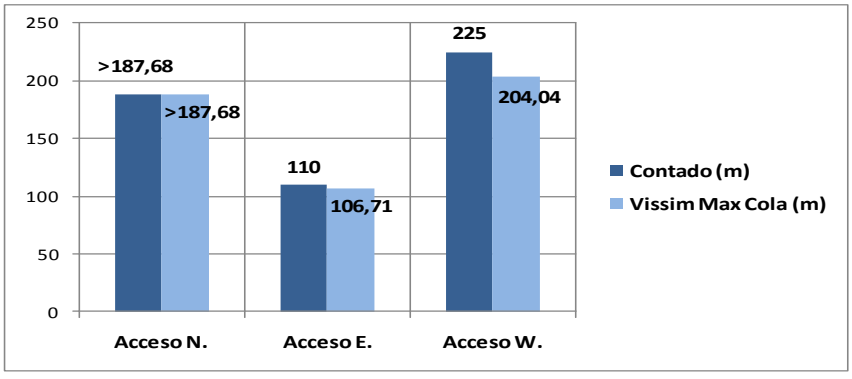
intersecciones mientas el semáforo vehicular permanecía en rojo, en la franja horaria de las 17:45 – 18:45.

Tabla 37. Comparación de largos de cola en cruces semaforizados

Carrera 43A con Cl 5A - Cl 7.					
Ingresos en la red evaluada	Vissim Max Cola (m)	Contado (m)	Diferencia Absoluta (m)	Diferencia (%)	Diferencia Absoluta (un vehicular)
Acceso N.	>187,68	**>187,69**			
Acceso E.	106,71	**110**	**3,29**	**3%**	menos de 1 un vehicular
Acceso W.	204,04	**225**	**20,96**	**9%**	3,5
Carrera 43A con Cl 1 Sur					
Acceso E.					
Maniobra: E-N	97,26	**110**	**12,74**	**12%**	2,1
Maniobra: E -S	59,03	**61**	**1,97**	**3%**	0,3
Carrera 43A con Cl 4 Sur - Cl 5 Sur					
Acceso S.	120,64	**130**	**9,36**	**7%**	1,6
Acceso E.	129,01	**133**	**3,99**	**3%**	0,7
Acceso W.	118,69	**123**	**4,31**	**4%**	0,7

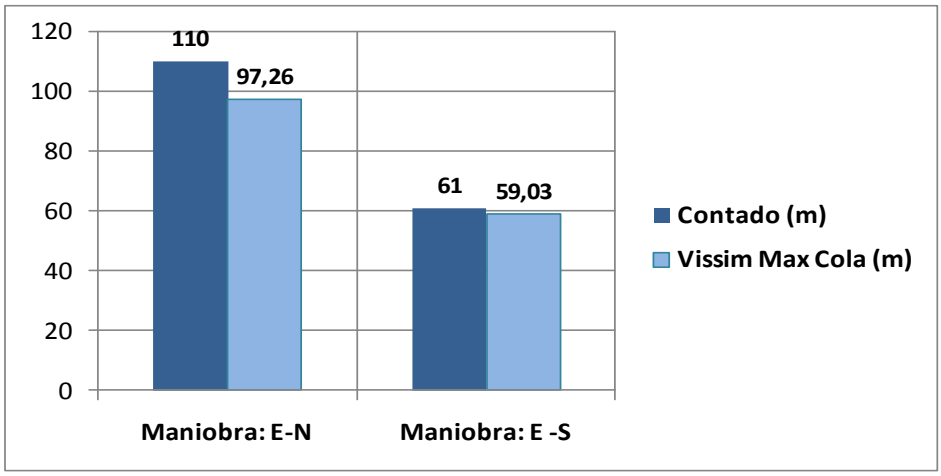
Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Año 2010

Figura 30. Contraste largos de cola. Cr 43A con Cl 5A – 7.



Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Año 2010

Figura 31. Contraste largos de cola. Cr 43A con Cl 1Sur.

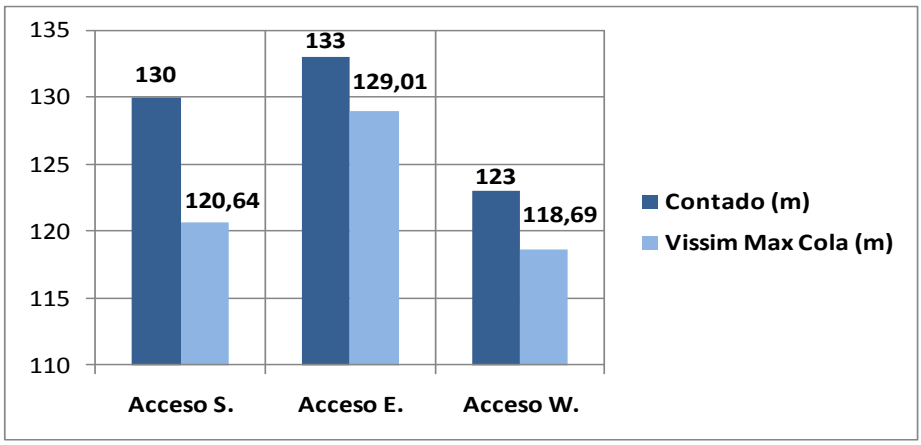


Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Año 2010

Figura 32. Registro fotográfico. Cr 43A con Cl 1Sur.

Fuente: Elaboración propia. Año 2010

Figura 33. Contraste largos de cola. Carrera 43A con Cl 4Sur - Cl 5Sur



Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Año 2010.

Figura 34. Registro fotográfico. Carrera 43A con Cl 4Sur - Cl 5Sur

Fuente: Elaboración propia. Año 2010

Consecuentemente con lo anterior, se observa aceptabilidad con respecto al parámetro "longitud de cola máxima", al comparase el valor del modelo versus las diferentes mediciones de campo, para los cruces semaforizados en cuestión.

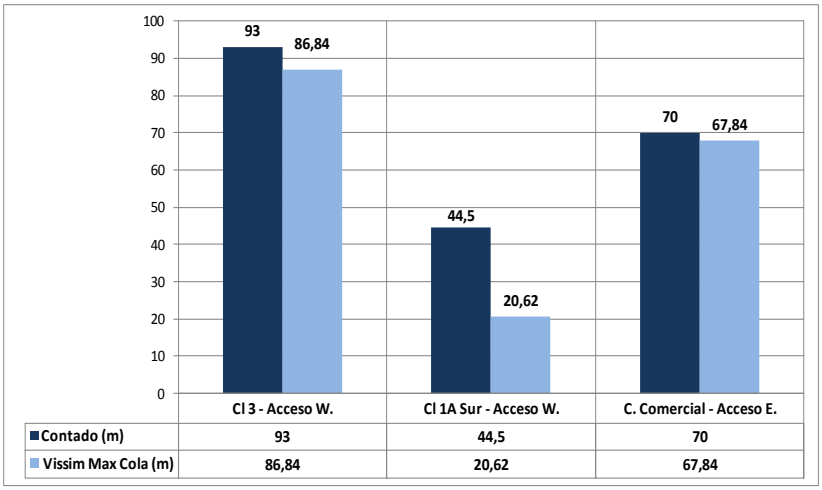
Tabla 38. Comparación de largos de cola, cruces no semaforizados

Carrera 43A con Cl 3					
Ingresos en la red evaluada	Vissim Max Cola (m)	Contado (m)	Diferencia Absoluta (m)	Diferencia (%)	Diferencia Absoluta (un vehicular)
Acceso W.	86,84	93	6,16	7%	1,0
Carrera 43A con Cl 1A Sur					
Acceso W.	20,62	44,5	23,88	54%	4,0
Carrera 43A con Salida Centro Comercial San Fernando Plaza					
Acceso E.	67,84	70	2,16	3%	0,4

Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Año 2010

Para los cruces no semaforizados, también se presenta un comparativo de la longitud de cola máxima medida en campo, versus la máxima longitud de cola arrojada por el modelo. Las mediciones se realizaron en campo en los ingresos de las respectivas intersecciones, cuando los vehículos no podían ingresar a la corriente vehicular principal (Avenida el Poblado).

Figura 35. Contraste largos de cola, cruces no semaforizados



Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Año 2010

Para el caso de las intersecciones no semaforizadas, se presenta aceptabilidad al contrastar largos de cola entre lo modelado, y lo determinado en campo.

4.2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO DE CONTROL RESPONSIVO

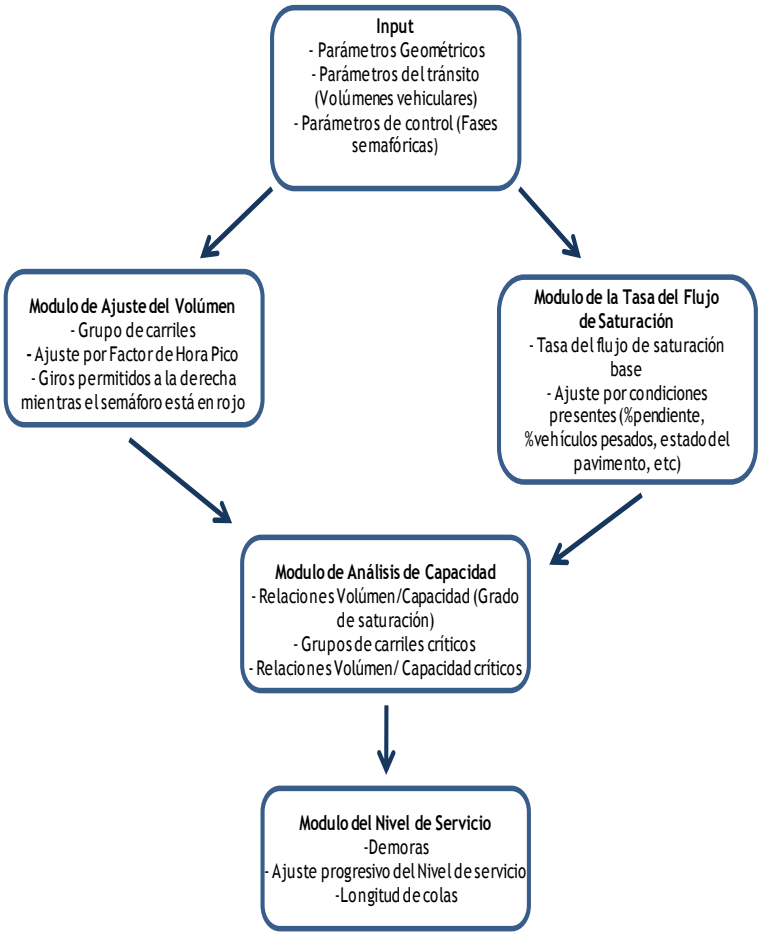
A partir del año 2005 y hasta la fecha, el control sobre la movilidad vehicular de la Avenida el Poblado se lleva a cabo mediante la aplicación de la tecnología de sistemas semaforizados de tiempos responsivos por semiactuación de la demanda de tránsito, permitiendo un mejor aprovechamiento de la capacidad para la vía principal (Avenida Poblado). Con esta operación responsiva, el sistema de semaforización ha alcanzado el aprovechamiento que la tecnología instalada puede ofrecer. No obstante, el compromiso de la ciudad es ofrecer al usuario un mejor servicio, por lo tanto con este trabajo dirigido de grado se hace necesario explorar a profundidad la necesidad o no, de que el control de la movilidad en el corredor estudiado, requiera migrar hacia la aplicación de una tecnología soportada en sistemas adaptativos y de mejorar considerablemente las variables de desempeño de la red, de tal manera que justifique o no, la alta inversión que conlleva tal decisión.

Una vez realizada la construcción del modelo, y que en términos generales se refiere a la conformación de la red, y procesamiento de la información, se procedió a instalar sobre las intersecciones objeto de estudio detectores en las vías secundarias; el siguiente paso fue crear un algoritmo de control por semiactuación de la demanda que reflejará las condiciones de la situación actual, para lo cual se procedió a calibrar y validar el modelo tratando de lograr representar la realidad lo más fiel posible. Dentro de la etapa de calibración del modelo se efectuaron, n corridas, y con base en ello se eligieron las 3 más significativas debido a que se ajustaban con mayor exactitud a los datos reales, (los parámetros con mayor sensibilidad en dichas simulaciones fueron el tiempo de verde mínimo y el grado de ocupación de los detectores). De estas alternativas se eligió la más real en referencia a las condiciones actuales de movilidad del tramo evaluado, y sobre ella se presentan todos los análisis.

En referencia al algoritmo de control responsivo éste fue creado a partir de la lógica de programación VAP, que es un lenguaje propio que trae el software VISSIM. Por definición VAP es una interface que permite crear una lógica de control basada en las fases, tiempos de transición de las fases (de acuerdo a la demanda vehicular y a los controles de accionamiento de la señal). La lógica de control se describe en un archivo de texto utilizando un lenguaje de programación simple. El mecanismo consiste en que durante la simulación se ejecuta VISSIM, VAP crea e interpreta los comandos de la lógica de control de la señal de la red VISSIM. Al mismo tiempo, diversas variables adquiridas mediante detectores reflejan la situación actual del tráfico mediante la simulación y procesamiento de la lógica VAP. Si se desea consultar detalles acerca de la creación de un algoritmo en VAP consultar numeral 4.3.2.1 del presente capítulo, que aborda dicha temática.

La metodología utilizada para el cálculo de la capacidad y el nivel de servicio de las intersecciones aforadas de la sub-red en estudio, está basada en el procedimiento propuesto por el HCM 2000 (Highway Capacity Manual). Este cálculo depende de los siguientes datos de entrada que definen la eficacia en el funcionamiento: geometría de la intersección, maniobras permitidas, tipo de control, y volúmenes vehiculares de cada maniobra, etc. Así mismo, el HCM propone una metodología distinta para cada tipo de intersección dependiendo del control que ésta tenga. En la siguiente figura se describe la metodología para las intersecciones semaforizadas

Figura 36. Cálculo de la capacidad y el nivel de servicio de intersecciones semaforizadas.

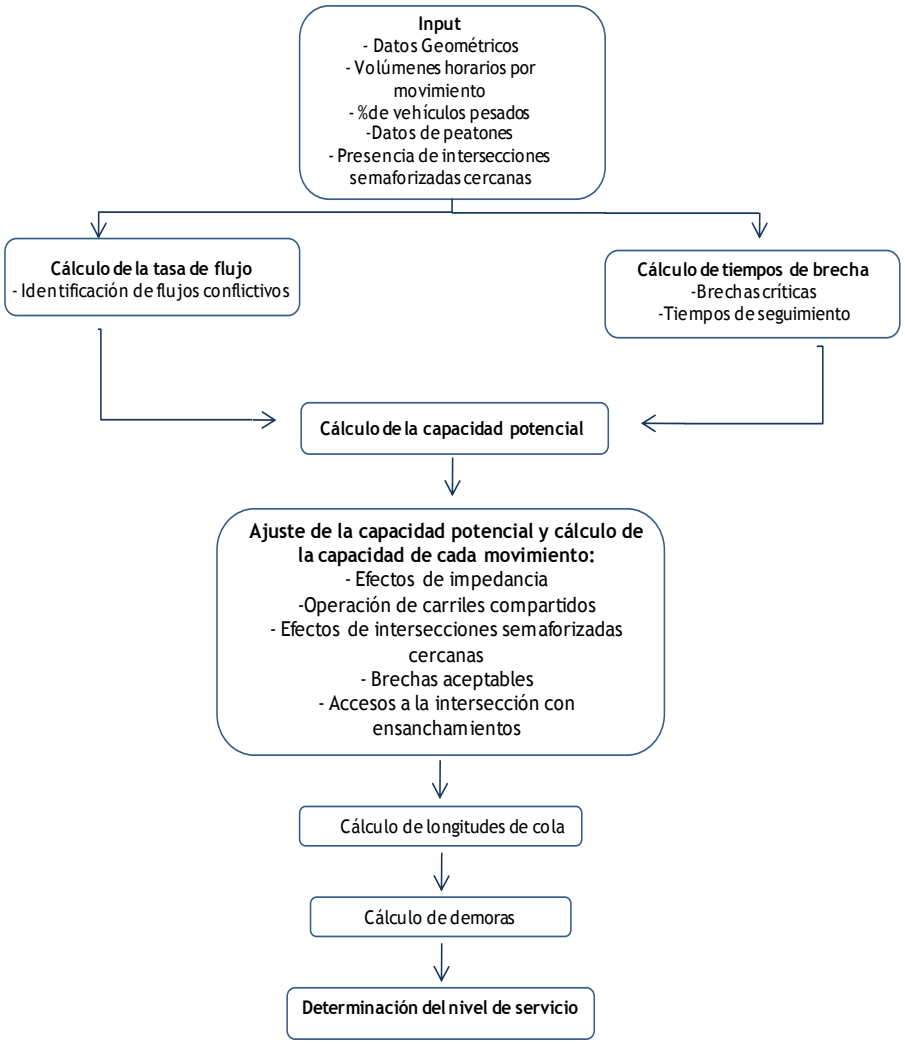


Fuente: Traffic Engineering Third Edition. Roger P. Roess, Elena S. Prassas, William R. MCShane. Pág 592

Para intersecciones no semaforizadas, se utilizó la metodología propuesta por el HCM 2000 para intersecciones de dos vías controladas por señal de PARE ("TWSC"

two- way STOP – controlled intersections). Esta metodología se representa en la siguiente figura:

Figura 37. Capacidad y el nivel de servicio de intersecciones no semaforizadas.



Fuente: Traffic Engineering Third Edition. Roger P. Roess, Elena S. Prassas, William R. MCShane. Pág 668.

El nivel de servicio de las intersecciones depende de la demora promedio por vehículo, en sus accesos. La siguiente tabla muestra el nivel de servicio que se obtiene para cada rango de las demoras, para ambos tipos de intersecciones: semaforizadas y no semaforizadas.

Tabla 39. Criterio nivel de servicio en intersecciones semaforizadas y no- semaforizadas.

NIVEL DE SERVICIO	DEMORA PROMEDIO (segundos/veh)	
	INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS	INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS
A	≤ 10	0 – 10
B	› 10 - 20	› 10 – 15
C	› 20 – 35	› 15 – 25
D	› 35 – 55	› 25 – 35
E	› 55 – 80	› 35 – 50
F	› 80	› 50

Fuente: Traffic Engineering Third Edition. Roger P. Roess, Elena S. Prassas, William R. MCShane. Páginas 590 y 669.

A continuación se presenta el reporte de resultados, calificados con base en el promedio de demora para cada link, teniendo como base si la intersección es controlada con señal de "pare", o mediante dispositivos de control de semáforos. Ver Tabla 40.

Es importante destacar que el software para microsimulación VISSIM, es bastante potente para la toma de decisiones que van desde los aspectos de tráfico propiamente dicho hasta los aspectos ambientales, los cuales también se pueden medir en campo y calibrar en el modelo. En el presente trabajo solo se analizaran los parámetros que tengan que ver con la movilidad vehicular, y con base en estos se podrán inferir decisiones.

Para la hora de máxima demanda con respecto a la evaluación de los indicadores de desempeño de toda la malla vial objeto de estudio, se analizan los siguientes parámetros:

El parámetro con la etiqueta **"Number of vehicles in the network"** corresponde al total del número de vehículos activos en la red al final del período de la simulación, (período de tiempo de 3600 segundos), y que para el caso correspondió a 359 vehículos. (Esta cifra no incluye los vehículos que ya llegaron y partieron hacia su destino final, ni la demanda latente).

El indicador cuya leyenda es **"Number of vehicles that have left the network"** significa el número total de vehículos que han salido de la red hacia su destino final durante el período de análisis, y corresponde a 6350 vehículos.

Tabla 40. Evaluación de nodos y links control semiactuado.

Subred vial evaluada: Avenida Poblado (Cr43A) entre Cl 5A-7 y Cl 4Sur-5Sur
Período evaluado: hora pico 17:45- 18:45

Intersección	Node		tStart	tEnd	Movement	veh_All	aveQueue	maxQueue	Delay	tStopd	Stops	EmissCO	EmissNOx	EmissVOC	FuelCons	Nivel de servicio
Carrera 43A con calle 5A-7	**Acceso SurEste**															
		1	900	4500	SE-N	296	30,85	106,71	77,90	57,94	2,18	673,83	131,10	156,17	9,64	E
		1	900	4500	SE-NE	66	30,85	106,71	59,63	41,40	1,86	123,52	24,03	28,63	1,77	E
		1	900	4500	SE-S	440	30,85	106,71	46,48	34,96	1,07	575,52	111,98	133,38	8,23	D
	Acceso W:															
		1	900	4500	W-NE	412	170,62	204,04	100,41	83,41	1,65	975,86	189,87	226,17	13,96	F
		1	900	4500	W-N	7	170,62	204,04	95,11	81,17	1,29	14,79	2,88	3,43	0,21	F
		1	900	4500	W-S	95	170,62	204,04	124,47	100,39	2,73	303,03	58,96	70,23	4,34	F
	Acceso N:															
		1	900	4500	N-S	1199	127,56	187,68	81,26	50,36	2,44	2928,23	569,73	678,65	41,89	F
		1	900	4500	N-S	31	127,56	187,68	79,51	49,68	2,23	61,56	11,98	14,27	0,88	E
		1	900	4500	N-E	159	170,62	204,04	76,73	48,85	2,38	379,26	73,79	87,90	5,43	E
		1	900	4500	N-W	55	51,69	141,26	45,93	26,19	1,24	75,49	14,69	17,50	1,08	D
		1	900	4500	N-N	90	170,62	204,04	68,86	42,46	2,21	193,14	37,58	44,76	2,76	E
Carrera 43A con calle 3	**Acceso W:**															
		2	900	4500	W-S	180	10,40	86,84	34,28	21,20	1,70	231,56	45,05	53,67	3,31	D
Carrera 43A con calle 1Sur	**Acceso Este**															
		3	900	4500	E-S	402	10,15	59,03	33,38	23,67	0,93	435,72	84,78	100,98	6,23	C
		3	900	4500	E-N	293	12,09	97,26	26,18	20,43	0,62	249,20	48,48	57,75	3,57	C
Carrera 43A con calle 1ASur	**Acceso W:**															
		4	900	4500	W-S	77	1,33	20,62	14,78	9,29	1,16	68,98	13,42	15,99	0,99	B
Carrera 43A con calles 4 Sur y 5 Sur	**Acceso NW**															
		6	900	4500	NW-SE	86	20,46	118,69	44,62	31,04	1,24	132,16	25,71	30,63	1,89	D
		6	900	4500	NW-S	115	20,46	118,69	41,60	27,96	1,13	156,41	30,43	36,25	2,24	D
		6	900	4500	NW-NE	240	20,46	118,69	63,00	44,89	1,43	461,98	89,88	107,07	6,61	E
	Acceso SE															
		6	900	4500	SE-NW	105	72,26	129,01	113,49	73,95	3,48	343,58	66,85	79,63	4,92	F
		6	900	4500	SE-SW	91	72,26	129,01	125,12	81,98	3,52	333,89	64,96	77,38	4,78	F
		6	900	4500	SE-S	90	72,26	129,01	119,99	80,63	3,57	412,36	80,23	95,57	5,90	F
		6	900	4500	SE-NE	133	72,26	129,01	108,58	69,97	3,19	406,65	79,12	94,24	5,82	F
	Acceso SW															
		6	900	4500	SW-NW	6	70,19	120,64	62,55	45,19	1,50	12,29	2,39	2,85	0,18	E
		6	900	4500	SW-SE	143	70,19	120,64	55,71	37,26	1,20	215,34	41,90	49,91	3,08	E
		6	900	4500	SW-SW	24	70,19	120,64	80,24	56,43	2,25	55,05	10,71	12,76	0,79	F
		6	900	4500	SW-NE	1357	70,19	120,64	50,25	31,64	1,17	1777,60	345,86	411,98	25,43	D
Centro comercial San Fernando Plaza	**Acceso SurEste**															
		7	900	4500	SE-N	145	15,21	67,84	76,04	58,59	3,02	379,62	73,86	87,98	5,43	F

NOTA: Para las intersecciones de la Avenida el Poblado con calle 3, calle 1A Sur y Centro Comercial San Fernando Plaza, su nivel de servicio se califico en base al HCM, para intersecciones reguladas no semaforizadas. Las demás fueron evaluadas igualmente con el HCM para intersecciones controladas con semáforos.

Fuente: Elaboración propia

Con referencia al parámetro **"Latent demand",** éste expresa el número de vehículos que no pueden entrar a la red ya sea a través de los ingresos/accesos a la malla vial o por estacionamientos. El modelo los estima y son del orden de 1418 vehículos, en efecto, es el número de vehículos que al final de la simulación están esperando entrar a la malla vial y no son contados como vehículos activos.

El modelo arroja un valor de 140,81 horas para el indicador de efectividad **"Latent delay time [h]".** Este se interpreta como el tiempo total de espera de todos los vehículos, que no podrían entrar a la red inmediatamente. Así mismo, Incluye el tiempo de espera de los vehículos que han ingresado en la red antes del final de la simulación.

De todo lo anterior se obtiene:

- De la tabla 32, se observa que el volumen total de vehículos ingresados a la red y procesados por el modelo corresponde a 6.337 vehículos, durante 3600 segundos de simulación. El valor medido con aforos vehiculares fue de 7.471 vehículos, este fenómeno se debe en parte a que las condiciones de borde del modelo fueron calculadas para tiempo fijo, por tanto el número de vehículos procesados es menor que si se operase con un control semiactuado que corresponde al caso que se tiene en campo. (Ver explicación de condiciones de borde para el modelo de la subred evaluada)

- De otro lado, y con base en el modelo:

  La suma (vehículos activos + vehículos procesados + los vehículos que llegan) = 8127

  Valor que corresponde a la demanda total de los vehículos, introducida arco por arco, o a través de matrices para el período de simulación. (8.127 vehículos)

Esto obliga, explicar, que en realidad al evaluar la red para el período de la hora de máxima demanda se incluyo dentro de la calibración del modelo una etapa denominada de precalentamiento la cual consistió en alimentar el modelo con volúmenes vehiculares durante 15 minutos adicionales y previos, a los 60 minutos evaluados en la hora punta. Lo anterior, con el fin de lograr obtener un modelo lo más real posible a las condiciones de movilidad del tramo evaluado en la hora de mayor congestión.

Continuando con el análisis de los demás indicadores de efectividad del modelo, se observa:

El parámetro cuya etiqueta es **"Total Distance Traveled [km]",** indica la distancia total recorrida de los vehículos procesados en la red (los que ya salieron al final de la simulación), más los activos. Para el caso corresponde a 4.400,5 km. Esto se explica porque no todos los vehículos tienen una trayectoria de travesía que atraviese en su totalidad el corredor evaluado, puesto que parte de ellos usa la red evaluada bien sea para acceder o salir del sector comercial y/o residencial.

El indicador de efectividad rotulado **"Total travel time [h]",** significa el tiempo total de viaje de todos los vehículos activos y que han llegado. El modelo arroja un resultado de 366,4 horas.

El modelo reporta un valor de velocidad de 12 km/h, para el parámetro denominado **"Average speed [km/h]",** el cual representa la velocidad media como la distancia total/Tiempo total de viaje.

El Parámetro llamado **"Total delay time [h]",** expresa el tiempo total de demora de todos los vehículos activos dentro de la red y de todos los vehículos que han llegado a la red. El tiempo de demora incluye las demoras por paradas de los vehículos, pero no incluye el tiempo de permanencia del bus/tranvía en los puntos autorizados de parada (Bahías de buses, etc). Aparcamientos en cualquier tipo de estacionamiento tampoco están incluidos. Corresponde a un valor de 266,04 horas.

Para el parámetro cuya leyenda es **"Average delay time per Vehicle [s]",** el modelo arroja un resultado de 142,76 segundos. Este parámetro explica la demora promedio por vehículo en la red evaluada como:

Ecuación 28.

$$\text{Average delay time per Vehicle}[\text{s}] = \frac{\text{Total delay time}}{veh_activos + veh_llegaron}$$

De otro lado, el modelo indica un resultado de 158,62 horas con respecto al indicador demora total por parada para todos los tipos de vehículos de la red evaluada, este parámetro corresponde a la etiqueta denominada **"Total Stopped delay [h], All Vehicle types",** y se explica como el total de tiempo detenido de todos los vehículos activos y de los vehículos que han llegado. Estrictamente el tiempo de demora es igual al tiempo cuando los vehículos están completamente detenidos y su velocidad es cero.

En VISSIM, el indicador de efectividad denominado **"Average stopped delay per Vehicle [segundos]**", caracteriza el total del número de paradas tanto de todos los vehículos activos, como de todos los vehículos que han llegado a la red. El modelo reporta un resultado de 85,11 segundos/veh. Su expresión matemática es:

Ecuación 29.

$$\text{Average_ stopped_ delay per Vehicle}[s] = \frac{\text{Total_ stopped_ delay}}{veh_activos + veh_arrived}$$

Con respecto al parámetro llamado **"Number of stops, all Vehicle types",** representa el número de paradas de todos los vehículos activos y los vehículos que han llegado a la red. Para el modelo se obtuvo un valor de 26786 paradas durante el período de simulación de la hora de máxima demanda.

El desempeño para todos los vehículos de toda la red evaluada en cuanto al indicador cuya leyenda corresponde "**"Average number of stops per vehicles",** indica un número promedio de paradas por vehículo de 3,99 paradas/vehículo**".** Su expresión matemática está dada por:

Ecuación 30.

$$\text{Average_ number_ of_stops_per Vehicle} = \frac{\text{Total_ number_ of_stops}}{veh_activos + veh_arrived}$$

- Se puede afirmar, con base en el análisis realizado en la etapa de calibración del modelo, que en cuanto al largo de colas que arroja el modelo, éste parámetro se encuentra en términos generales ajustado y consecuente con las mediciones de campo y con los videos filmados en el tramo vial objeto de análisis, los cuales también se anexan como parte de la investigación. (Ver Anexo 10)

La tabla 41, expresa y resume los indicadores de desempeño del control responsivo del modelo calculado con la plataforma Vissim, mediante lógica de programación VAP.

Tabla 41. Desempeño de la malla vial control responsivo

Subred vial evaluada: Avenida Poblado (Cr43A) entre Cl 5A-7 y Cl4Sur-5Sur
Período evaluado: hora pico 17:45 - 18:45

Network Performance
Estrategia de control Semiactuado

Alternativa elegida – Indicadores de desempeño

PARAMETER (Simulation time from 900.0 to 4500.0.)	**VALUE**
Average delay time per vehicle [s], All Vehicle Types	142,76
Average number of stops per vehicles, All Vehicle Types	3,99
Average speed [km/h], All Vehicle Types	12,01
Average stopped delay per vehicle [s], All Vehicle Types	85,12
Total delay time [h], All Vehicle Types	266,04
Total Distance Traveled [km], All Vehicle Types	4.400,5
Evaporation [kg], All Vehicle Types	-
Emissions Benzene [kg], All Vehicle Types	-
Emissions CO [kg], All Vehicle Types	-
Emissions CO2 [kg], All Vehicle Types	-
Emissions HC [kg], All Vehicle Types	-
Emissions NMHC [kg], All Vehicle Types	-
Emissions NMOG [kg], All Vehicle Types	-
Emissions NOx [kg], All Vehicle Types	-
Emissions Particulates [kg], All Vehicle Types	-
Emissions SO2 [kg], All Vehicle Types	-
Emissions Soot [kg], All Vehicle Types	-
Fuel Consumption [kg], All Vehicle Types	-
Latent delay time [h], All Vehicle Types	140,81
Latent demand, All Vehicle Types	1418
Number of Stops, All Vehicle Types	26786
Number of vehicles in the network, All Vehicle Types	359
Number of vehicles that have left the network, All Vehicle Types	6350
Total stopped delay [h], All Vehicle Types	158,62
Total travel time [h], All Vehicle Types	366,43

Fuente: Elaboración propia

4.3 CREACIÓN ESCENARIO CON ESTRATEGIA DE CONTROL ADAPTATIVO

Se parte de la realidad actual en donde se dispone de una infraestructura en la que se puede optimizar su utilización. Entonces, nuestro problema consiste en: ¿Cómo utilizar la red de intersecciones semaforizadas con aprovechamiento máximo del espacio en duraciones de tiempo que permitan minimizar la demora, con un cálculo en tiempo real?, y ¿Cómo lograr que se resuelva el interrogante mejor ciclo, mejor reparto del ciclo, y mejor desfase para una intersección o varias intersecciones que conformen un corredor vial arterial?

¿El tercer interrogante es cómo lograr mejor aprovechamiento de la capacidad en el corredor mediante la utilización de medición On Line de los vehículos, y a su vez con esta información calcular en línea el tiempo de ciclo, reparto, y desfasaje? (Lo que aumenta la complejidad de la solución)

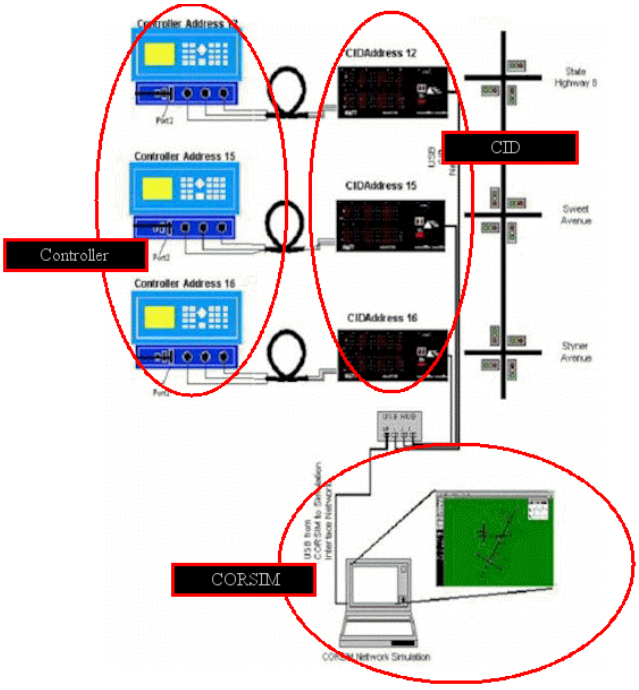
¿La cuarta pregunta es más difícil aún, pues si se admite que la decisión óptima para un acceso fuera calculable en tiempo real, la serie de acciones que se habrían de realizar en la red para poner en vigor tal propuesta podría provocar cambios en la demanda del carril capaz de hacer inadecuada tal solución o de producir un embotellamiento?. En otras palabras, cuando se consigue alcanzar la solución óptima, ésta ya dejó de serlo como consecuencia del propio proceso de adecuación de las señales a la temporización propuesta, independientemente de que las condiciones del tráfico hubieran permanecido estables. En definitiva se persigue un "objetivo móvil".

Migrar o no hacia una tecnología "On Line" con procesamiento en tiempo real será el siguiente paso, su aparición en escena se basará en procesamiento de los datos registrados por los detectores haciendo posibles que los cambios de ciclo - reparto y desfasamiento se lleven a cabo en respuesta a los movimientos reales del tránsito dentro del corredor geográficamente en estudio.

- Por lo tanto, la estrategia básica de los controladores adaptativos consiste en proponer periódicamente (al menos una vez por cada paso del tiempo) ligeras modificaciones de las temporizaciones vigentes con el objeto de ajustar la oferta de los semáforos a las condiciones de la demanda del tráfico reflejadas en los perfiles de demanda. Para llevar a cabo esta tarea se dispone de un hardware de control (HILS – "Hardware-in-the-loop simulation") en el que se destacan los siguientes elementos. Un controlador local encargado de procesar la información suministrada por los detectores asociados a dicho cruce, toma sus propias decisiones al realizar propuestas de temporización para cada cruce de semáforos ajustados a la demanda, varios controladores de zona, que actúan como sistemas intermediarios en el

proceso de comunicaciones, y finalmente una central de tráfico, que gestiona las comunicaciones (Tiene la función de supervisar que todo opere correctamente, que las bitácoras estén ok, y verifica que los planes de los controladores sean adecuados al garantizar sincronismo y buena movilidad.

Figura 38. Control Adaptativo. Comunicación entre software y hardware.



Fuente: Manual Interface VAP 216. PTV Planung Transport Verkehr AG. 2007
Hardware-in-the-Loop Simulation (Bullock, 2001)

Fuente: Manual Interface VAP 216. PTV Planung Transport Verkehr AG. 2007
. Hardware-in-the-Loop Simulation (Dixon, 2006)

En la figura 38, se muestran diagramas con la interconexión de equipos para una simulación de tipo HILS ("Hardware in the loop Simulation"). En este tipo de simulación, un software simulación de tráfico (VISSIM - abajo, CORSIM - arriba) es conectado a un CID ("Controller Interface Device"), mediante una interfaz, i.e. Un cable USB, que transporta todas las señales generadas por el software de simulación, para determinado escenario. A su vez, el CID interpreta y transporta dichas señales del software de simulación hacia la CU ("Controller Unit") para determinada red de semáforos. Consecuentemente, las señales generadas por la red de semáforos son enviados por la CU hacia su respectivo CID, que interpreta y envía estas señales al software de simulación, para continuar al siguiente ciclo de la misma.

Es importante recalcar que en un control Adaptativo, las condiciones locales son las que van a gobernar los tiempos que se asignan a cada una de las maniobras (grupo de señales). Es por esto, que la mayor inteligencia de un control adaptativo está fundamentada en el controlador local. (López et al, 2000).

Figura 39. Filosofía estrategia de control adaptativo

Fuente: Road and Transportation Research association steering committee Traffic and Traffic safety. Norma RILSA. Actualización año 2003

La figura 39, presenta la filosofía de funcionamiento de un control adaptativo, en donde se observa que para un tipo de control adaptativo se requiere un considerable esfuerzo técnico con respecto a la adquisición y procesamiento de datos que son relevantes para cada situación del tráfico y es seguido por una modificación de los programas de señal con generación flexible; esta filosofía se describe a continuación:

En un sistema de Control Adaptativo, todo es un proceso que se inicia desde la existencia de un "Modelo de flujo de tránsito", caracterizado por unos parámetros: volúmenes por tipo de movimiento (izquierdo, directo, derecha), su composición vehicular (autos, buses, camiones, motos, bicicletas), presencia de estacionamiento en la zona de estudio, carriles y/o bahías con paradas de buses, conflictos con peatones, etc. En un control adaptativo, también entra a jugar un papel importante el Modelo de seguimiento Car Following, y con ello la distancia de seguridad entre vehículos. Adicionalmente y de acuerdo a la figura 39, dentro de esos parámetros hay unos valores fijos que describen las características geométricas de los accesos en términos del número de carriles, ancho de carriles, pendientes, entre otros factores.

Por otra parte, existe un órgano de control, mediante el cual se adquieren los datos referentes a los parámetros de flujo. ¿Esos datos que llegan al órgano de control que se hacen? Se procesan. En el procesamiento de datos siempre ocurrirá "El estado Planeado" versus "El estado Actual". Por tanto se compara, y se decide.

Luego se trasmite esa decisión a las unidades de control, que sustituyen el Plan de Señal, el cual va directamente a los semáforos de la intersección de la vía en cuestión.

En cuanto al factor humano: Por su parte el conductor, percibe la información (PIEV), la interpreta y procesa, y tiene una reacción, da una volición (orden muscular), frena o acelera, o timonea, y eso consume cierto tiempo, y así maniobra el vehículo; pero además también recibe información del medio ambiente (lluvia, calor, etc). Al tomar la decisión lo transfiere al vehículo, arrancando, acelerando, frenando, timoneando, etc.

Luego vuelve y se repite el proceso para cada período (paso del tiempo).

4.3.1 Modelo

Partiendo del modelo creado para calibrar la subred mediante algoritmo con estrategia de control responsivo, se elabora un modelo que opere con estrategia de control adaptativo para las condiciones locales de la ciudad de Medellín en particular para la subred evaluada sobre la Avenida el Poblado entre calles 5A-7 y

4Sur-5Sur, para lo cual se implementan varios detectores sobre la vía principal y secundaria.

Por un lado, se aspira a hacer frente a un alto volumen de tráfico en una intersección o una serie de intersecciones, al cargar completamente la infraestructura vial con los volúmenes vehiculares registrados en campo en la hora de máxima demanda de la tarde. Por otro lado, el volumen de tráfico que sale de un cruce tiene que ser limitado en cuanto a la sostenibilidad de la carga de tráfico y la sobrecarga de la vía aguas abajo en concordancia con la capacidad de la vía, longitud de cola y funcionamiento de los semáforos. De tal manera que se obtenga un control de tráfico con una velocidad de desplazamiento sostenible.

En general se pretende que teniendo en cuenta las condiciones del entorno, al aplicar estrategias de control de accionamiento de tráfico tipo adaptativo, se puedan crear parámetros de control para:

- Eliminar las deficiencias en la coordinación
- Controlar longitudes de cola,
- Hacer un mejor uso de las reservas de capacidad en las intersecciones,
- Reducir los tiempos de viaje
- Disminuir las demoras promedio de las intersecciones
- Así como también estudiar la separación promedio entre intersecciones semaforizadas, y si el hecho de que a veces estén muy cerca o muy lejos influye, al evaluarse sistemas de control adaptativo.

Control y parámetros de evaluación

Con el fin de poder realizar el control de acuerdo a los objetivos definidos, directa o indirectamente los valores objeto de medición tienen que ser definidos, y si se van a utilizar para un control del tráfico adaptativo, deben ser adquiridos "On-Line". Para la presente investigación la mayoría de los valores objetivo no se pueden medir directamente, por cuanto se conseguirán según pre-tratamiento de los datos de medición efectuados en terreno. Lo anterior para la toma de decisiones del algoritmo de control objeto de diseño. Para el caso, algunos parámetros de evaluación de las estrategias de control adaptativo también se podrán determinar por simulación, y la principal función objetivo será llevar la demora total y media a valores mínimos. Un análisis elemental permite comprobar la complejidad del problema si se trata de determinar la función objetivo en tiempo real.

Un diseño de control adaptativo debe cubrir los niveles de carga variable durante un día (horas pico, los períodos de carga de tráfico normal y bajo), la semana (sábados con horario variable, domingos, festivos, etc), un año (Los tiempos" normal", las vacaciones, las horas principales de compras) y las cargas de tráfico finalmente excepcionales (por ejemplo, viajes de placer, el tráfico relacionados con

un evento en particular). El objetivo es una calidad del flujo de tráfico lo mejor posible para todos los grupos de usuarios.

De otro lado, los parámetros adecuados para describir el flujo de tráfico pueden ser también utilizados como parámetros de control: intervalos de tiempo, período de ocupación, velocidad, solicitud de peatones y ciclistas, volumen de tráfico, etc. En este estudio los valores medidos en campo correspondieron a volúmenes medidos en los ingresos, velocidades puntuales de desplazamiento, velocidades de recorrido y marcha (método del vehículo flotante), largos de cola; y para el componente de las rutas de transporte público se midió el tiempo que éstas permanecían detenidas sobre el paradero autorizado.

- **Ajuste del tiempo de verde**

  Para el algoritmo de control, el parámetro flujo de tráfico está relacionado entre sí con las ecuaciones de estado y los valores de umbral para la selección del programa de señal.

  Hay varios métodos para ajustar los tiempos de verde a la situación actual del tráfico en una intersección. La diferencia estriba principalmente en el criterio por el que se anula una duración de verde en favor de otro flujo de tráfico.

  El ajuste del tiempo de verde midiendo el *grado de ocupación de los vehículos sobre el detector*, es utilizado en la presente investigación y evalúa el flujo de tráfico considerando el volumen de tráfico, la velocidad y la longitud del vehículo. Particularmente los intervalos de tiempo más largos ocurren en el arranque de vehículos pesados. Los valores de medida son evaluados separadamente para cada carril. El parámetro es entonces el grado de ocupación.

  Sin embargo y de acuerdo a todo lo expuesto, cuando se trata de un control adaptable, los tiempos para el intervalo inicial y de extensión, pueden variar automáticamente en relación con el panorama general de la circulación en cada acceso, de acuerdo a las fluctuaciones de demanda. (Cal y Mayor, 2007).

- **Conformación del Programa de Señal**

  La conformación del programa de señal implica que los usuarios de la vía pueden influir en los tiempos de verde, así como en el número y la secuencia de fases.

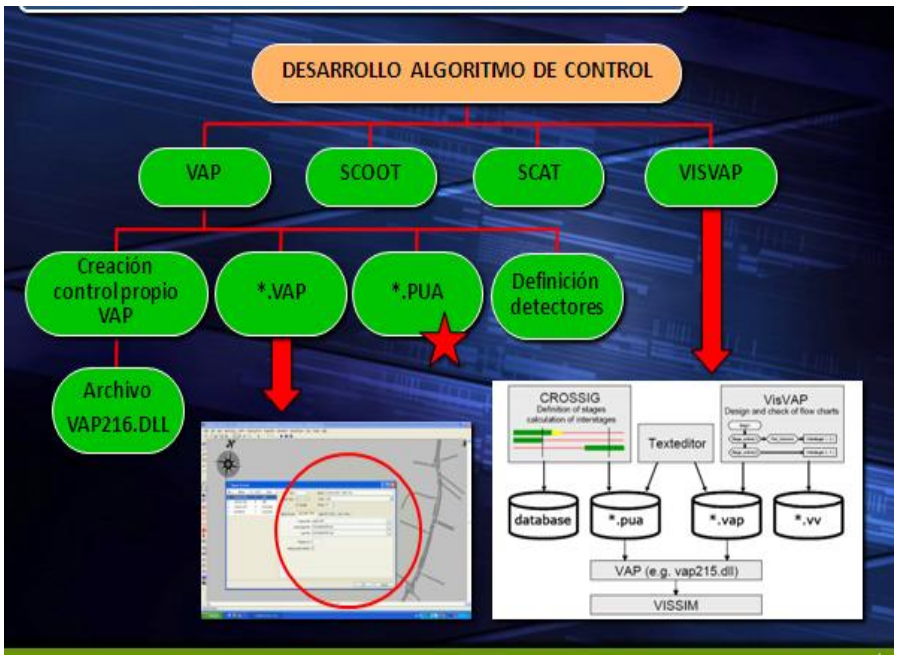
Los ítems dados son: Número máximo de fases requeridas, duración mínima y máxima de los tiempos de verde, tiempos o transiciones de fases para todas las secuencias de fases, y secuencia de fases más favorable si todas las fases son requeridas.

El esfuerzo para la adquisición de datos es también grande. La distancia de los detectores hasta la línea de semáforo depende del método utilizado para la formación del programa de señal y siempre debe fijarse de manera que la petición pueda ser respondida de inmediato.

4.3.2 Desarrollo del algoritmo de control

El algoritmo de control es necesario para describir las acciones de la(s) intersección(es) que operan mediante un sistema de estrategia de control adaptativo y establecer determinaciones claras e inequívocas para la programación del software del equipo de control. La metodología acerca de cómo desarrollar el algoritmo de control sobre un modelo microscópico se describe a continuación. El algoritmo de control se debe determinar en detalle por cada segundo y está influenciado directamente por las condiciones del entorno.

Figura 40. Desarrollo algoritmo de control



Fuente: Elaboración propia

Un control de estrategia adaptativo creado con lógicas propias en un modelo microscópico computacional como lo es el Vissim requiere de la interfaz VAP (Vehicle Actuated Programming) o VISVAP para el caso a estudiar, según se desee para el tipo de aplicación. También se pueden acoplar complementos al Vissim con lógicas de control de señales ya prediseñadas incluyendo el caso de SCAT (de procedencia australiana), SCOOT (de origen inglés), etc.

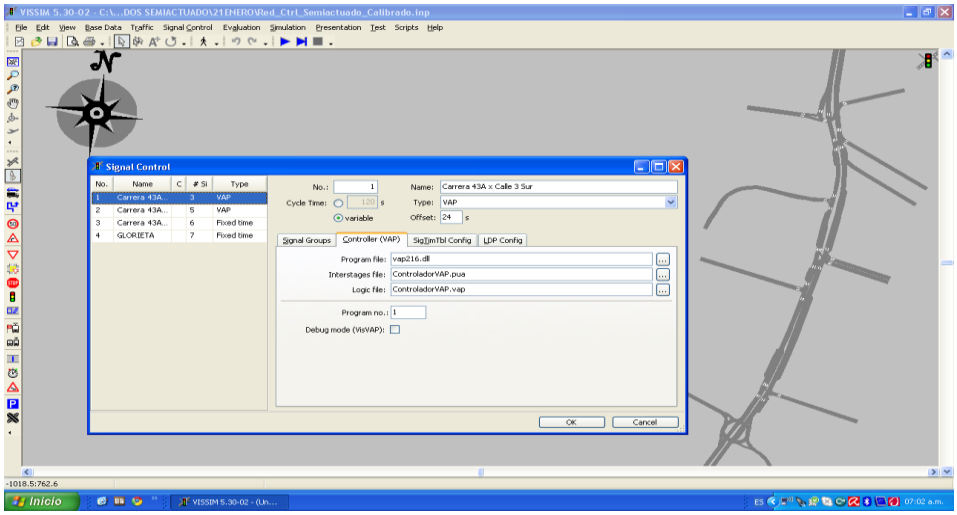
4.3.2.1 Lógica de control VAP

Dentro de la lógica VAP, son dos los aspectos más relevantes:

Creación de un control propio VAP para controladores de señal

Dentro de una serie de controladores de señal existentes en VISSIM se puede establecer el tipo VAP mediante el menú CONTROL DE SEÑAL (SYGNAL CONTROL), y luego buscar el menú edición de controladores (Edit Controllers). Para especificar los archivos correspondientes, se selecciona el controlador (VAP) de la lista que aparece en el cuadro de dialogo. No obstante, para la creación de la lógica de control es necesario disponer del archivo **VAP216.DLL**, el cual se especifica como archivo de programa en dicho menú. (Lo anterior, si se cuenta con la versión 5.30 de VISSIM). Adicionalmente, debe crearse un archivo de definiciones de la lógica **(*.VAP)** y un archivo que contiene las diferentes fases **(*.PUA)** y ambos deben ser seleccionados. Además, los grupos de señal, y los detectores deben ser previamente definidos. Consecuentes con lo anterior la figura 41, ilustra esto:

Figura 41. Construcción de un controlador propio en VAP.



Fuente: Elaboración propia. Plataforma software Vissim 5.30.
PTV Planung Transport Verkehr AG. Alemania. 2010

- **Descripción de un archivo *.PUA**

La definición de grupos de señales, fases, y secuencia de fases se define en el archivo *. PUA

La generación de un archivo *.PUA puede ser editado de forma manual, o exportado desde otro programa que proporcione estos datos. A modo de ejemplo, el programa CROSSIG de la compañía PTV AG, ofrece una función de exportación para crear archivos *. PUA. Como mínimo, este archivo contiene la siguiente información:

a. Definición de todos los grupos de señal
b. Definición de todas las fases (lógica de los grupos de señal)
c. Definición de la fase inicial basada en la lógica del grupo de señales
d. Además, la lógica de fases en algunos casos requiere de la definición de secuencia de fases.

- **Descripción de un archivo *.VAP**

El archivo VAP es un archivo de texto plano, donde se escribe la lógica para determinado Controlador de Señales que afecta ciertos Grupos de Señales, dicha lógica es escrita en lenguaje de programación VAP.

Los siguientes operadores están disponibles en VAP, la precedencia del operador a la hora de ejecutar una expresión es mostrada en la primera columna:

Tabla 42. Operadores en VAP

Operator		Meaning
6	(,)	Parentheses
5	NOT	logical NOT (unary)
4	AND	logical AND (binary)
4	*, /	Multiplication, Division
4	%, \	Modulo, integer division
3	OR	logical OR (binary)
3	+, -	Addition, Subtraction (binary)
2	=, <>, <, <=, >, >=	comparison
1	-	sign (unary)

Fuente: Manual del Usuario. Interface VAP 2.16. PTV Planung Transport Verkehr AG. 2007.

El lenguaje de programación en VAP consta de muchos elementos de programación, las generalidades del lenguaje de programación VAP, pueden ser resumidas en la tabla 43.

Tabla 43. Elementos del lenguaje de programación

Elementos	Descripción
Formato de datos	El lenguaje de programación VAP puede procesar números enteros y números reales. La conversión de tipos se controla internamente y por lo tanto invisible para el usuario. El rango de número entero se limita a los valores -2147483639 a 2147483639.
Expressions	Mediante expresiones se define la lógica de programación. A continuación se definen algunas reglas que deben cumplir las expresiones, el listado completo puede ser consultado en el Manual del Usuario, "Interface VAP 2.16. PTV Planung Transport Verkehr AG": - Los operandos de las expresiones pueden ser variables, constantes y constantes numéricas, así como todas las funciones proporcionadas por el lenguaje de programación. - Expresiones negativas siempre deben ir entre paréntesis.
Título del Programa	El primer comando de un programa de VAP (en un archivo *. VAP) debe consistir en una palabra clave del "PROGRAM", es decir, el nombre del programa (como un identificador válido) y un punto y coma.
Identificadores	No hay distinción entre letras en mayúsculas y minúsculas. Por lo tanto OK, ok, Ok, pueden caracterizar a la misma variable y IF, if, If, y iF se reconocen como la palabra clave if. Se recomienda mantener la ortografía.
Controller Frequency	La frecuencia de control de un programa VAP se puede definir como la primera declaración por debajo de la cabecera del programa. Esta declaración consiste de la palabra clave VAP_Frequency, el número de pasadas a través de la lógica VAP por segundo de simulación y, un punto y coma. La frecuencia controlador debe estar en el rango de 1 a 10 y debe ser un factor de la resolución de simulación (pasos de tiempo de simulación por segundo). Si esta declaración no se encuentra en un programa de VAP, la frecuencia por defecto que se utiliza es 1.
Constantes	Hay dos tipos de constantes: - Constantes de sistemas utilizan los números del grupo de señal o de la fase o descripción inter-fase como identificadores de la fase correspondiente, o números internos del grupo de señal VISSIM. - Constantes definidas por el usuario que reciben un valor asignado en el proceso de definición mediante CONST.
Variables	Las variables se definen automáticamente por su uso o por el contexto de su uso en el texto del programa. El inicio del programa después de la compilación donde se restablecen todas las variables a cero. Variables temporizadas se manejan de manera diferente: Su valor no puede ser cambiado por una asignación regular, pero si por uno de los tres comandos temporizador START, STOP y RESET. Una vez que una variable temporizada se ha iniciado, su valor se incrementa por el tamaño del paso de tiempo del controlador (recíproco de la frecuencia del controlador) al inicio de cada pasada a través de la lógica.
Subrutinas	El lenguaje de programación VAP utiliza un concepto de subrutina. Esto es útil para una jerarquización de la tarea de control (Top-Down-Design). También permite la definición de múltiples secuencias, solo una vez, dentro del programa. En un programa VAP cualquier número de subprogramas puede ser definido (sólo limitado por el espacio en RAM). Cualquier subrutina predefinida se puede llamar dentro de un programa mediante el comando GOSUB.
Grupos de señal y detectores	Se codifican como números enteros. En VAP los grupos de señales y los detectores son referidos usando éstos números como argumentos en las llamadas a funciones. Además, hay restricciones internas sobre el número máximo de grupos de la señal y detectores. En la versión actual, estos valores se establecen en 999.

Elementos	Descripción (continuación)
Comandos de Temporizador (timer commands)	Los comandos de temporización de inicio, Start, Start_at, Stop y Reset sólo afectan a las variables temporizadas proporcionadas por el lenguaje de programación. Estas variables son contadores de tiempo que: - Se activan con los comandos de inicio START(<timer>) o START_AT (<timer>, <value>), donde el comando START_AT, se puede utilizar para iniciar un temporizador con un valor inicial. - Se incrementan por la longitud del paso de tiempo del controlador antes de cada pasada a través de la lógica de VAP - Se pueden detener con el comando STOP (<timer>) (el valor del temporizador no se restablece) - Se puede poner a cero mediante el comando RESET (<timer>).
WAIT_AT-UNTIL	El comando WAIT_AT-UNTIL se puede utilizar para ensamblar un bucle de tiempo. Primero la expresión UNTIL es evaluada. Una vez evaluada, la ejecución del programa continúa con el siguiente comando.

Fuente: Traducción Manual del Usuario. Interface VAP 2.16. PTV Planung Transport Verkehr AG

En coherencia con lo anterior y de acuerdo a la metodología consignada, la interacción de los diferentes elementos de programación crea un nuevo controlador propio de señal (SC) VAP.

Ejecución de un control propio en VAP

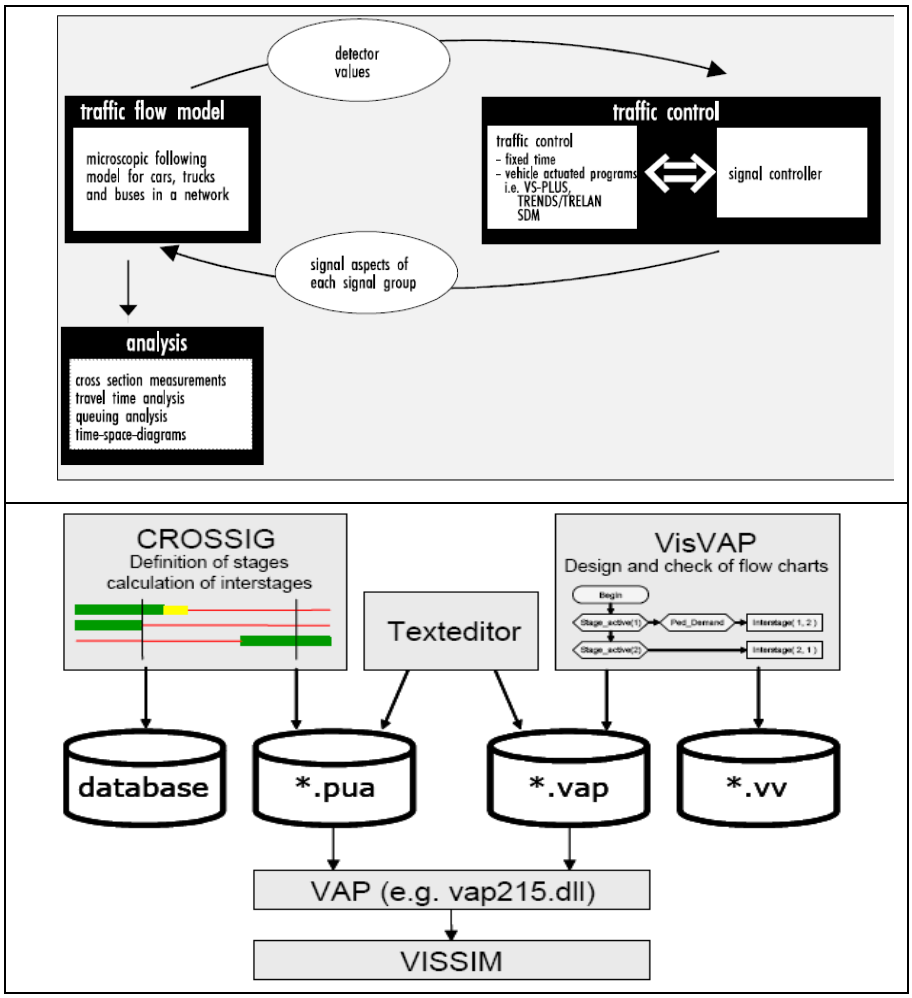
Durante la ejecución de una simulación VISSIM la lógica VAP, se suele llamar una vez al final de cada paso de simulación después de que los vehículos han sido movidos. Si la resolución de la simulación es más de un paso de tiempo por segundo de simulación, la frecuencia del controlador de VAP se puede establecer en un valor más alto (1 .. 10), a través de la declaración VAP_Frequency en el archivo *.VAP. La frecuencia de control debe ser un factor entero de la resolución de simulación, es decir, la longitud del paso de tiempo del controlador debe ser un múltiplo de la longitud de un paso de tiempo de simulación.

Por lo general, todo cambio o edición que se realice al programa se ejecuta en VAP, y al correr el programa, esto permite que los valores de los detectores sean recogidos y evaluados durante las fases, y así lograr ver indicadores de efectividad impuestos por el cambio realizado.

De esta forma, el detector recibe información del simulador de tráfico el cual opera en régimen de tiempo discreto con pasos (de 1 hasta 10 veces). La simulación genera una visualización On-Line de las operaciones de tráfico, y fuera de línea, la generación de archivos de salida de la recopilación de datos estadísticos, como los tiempos de viaje, y longitudes de cola, etc.

Esquemáticamente se muestra la forma en que se determina el estado de la señal para el paso de tiempo siguiente, y como devuelve esta información al simulador de tráfico.

Figura 42. Comunicación entre simulador de tráfico y el generador de estado de señal.



Fuente: PTV Traffic Mobility Logistics. VAP 2.16. Interface Use Manual. 2007

De acuerdo con lo anterior, es importante destacar que la diferencia entre las interfaces del lenguaje de programación VAP y VISVAP, estriba principalmente en su forma, debido a que en VISVAP toda la lógica se desarrolla a través de un diagrama de flujo, como se muestra a continuación. Es decir, VisVAP aumenta el uso de la lógica de control libre de la señal definida usando el lenguaje de programación VAP (Vehículo Accionado de Programación) para ofrecer una herramienta cómoda para la creación y edición de programas lógicos como diagramas de flujo. La

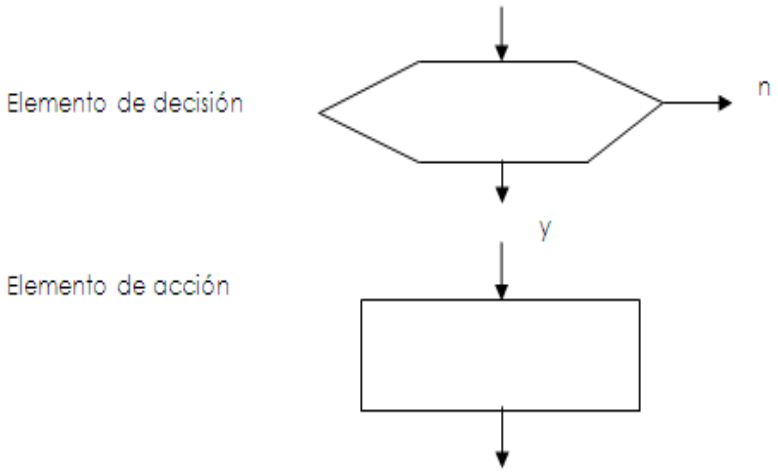
apariencia y el diseño de diagramas de flujo en VISVAP es tomado de la Norma RILSA 1992 (Norma Alemana para los controladores de la señal) y se ha mejorado en el lenguaje de programación VAP para facilitar vínculos y otras características.

Diagrama de flujo

El diagrama de flujo contiene la lógica y las condiciones de tiempo para la duración de las fases y el cambio de las transiciones de fase. Por lo tanto, representa el proceso completo de control de tráfico-adaptativo. Las Condiciones de tiempo determinan el marco temporal del flujo de programa, como lo son, los puntos dentro de la coordinación (por ejemplo, las primeras o últimas terminaciones de una fase) o tiempos verde mínimo y máximo de un grupo de señales en un ciclo de tiempo no fijo, o dentro de la coordinación.

El diagrama de flujo se compone principalmente de elementos de decisión y acción.

Estructura de un diagrama de flujo



Fuente: Elaboración propia, basada en la Norma RILSA. (1992). Actualización al año 2003. Alemania.

Elementos de decisión, a manera de ejemplo, puede incluir: condiciones lógicas, las condiciones de tiempo, u otras condiciones.

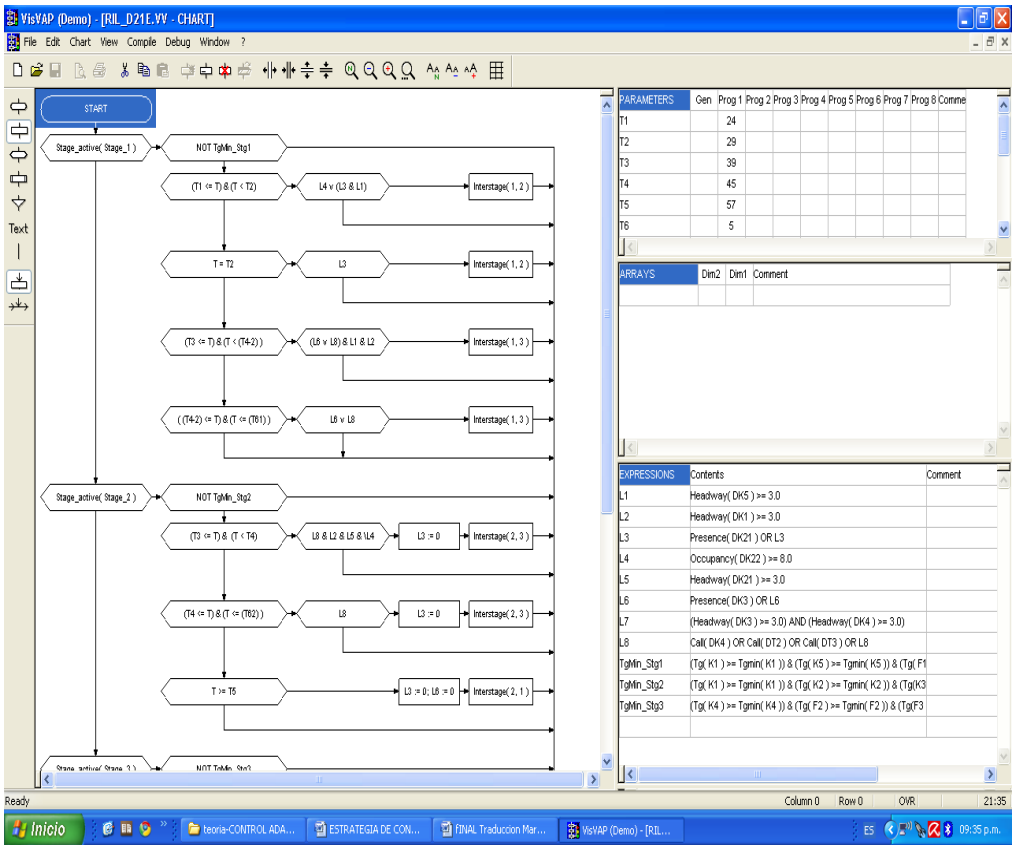
Elementos de acción pueden incluir: Descripción y duración de la transición de fase, descripción de la fase de encendido o contadores de tiempo, y otros parámetros.

El siguiente diagrama de flujo ilustra de forma general la lógica de programación en VISVAP. Así mismo, explicaciones adicionales sobre cómo representar el algoritmo de control en el diagrama de flujo de VISVAP, se encuentran en el manual del usuario.

Básicamente toda la lógica de programación en VISVAP se encuentra estructurada, a través de 4 paneles que contienen información sobre:

- Lógica del programa (diagrama de flujo)
- Parámetros,
- Matrices
- Expresiones y
- Asignación de subrutinas.

Figura 43. Lógica de control en VISVAP.



Fuente: Elaboración propia basada en DEMO VISVAP.

4.3.3 Resultados estrategia de control Adaptativo

Los sistemas de control de tráfico modernos incorporan una gran cantidad de elementos de hardware como detectores, semáforos, reguladores, entre los cuales el controlador juega un papel fundamental. La incorporación de tecnología de avanzada a esta rama de la ingeniería ha permitido aplicar sofisticados métodos de control, que, como el que aquí nos ocupa son capaces de modificar, en tiempo real, las temporizaciones actuales de los cruces en función de las características actuales del tráfico. La complejidad de este tipo de sistemas hace que sea necesario construir un modelo de la red a controlar y que, para disminuir la complejidad del software de control, se divida el problema en subproblemas de control independientes cuyas soluciones parciales habrá luego que conjuntar en propuestas concretas que serán implantadas en la calle. En el presente trabajo se pretendió dejar sentada una metodología en la aplicación de este tipo de modelos.

En la investigación que nos ocupa, la construcción de un sistema que opere mediante estrategia de control adaptativo necesitó un considerable esfuerzo técnico con respecto a la adquisición y procesamiento de datos que son relevantes para cada situación del tráfico, de tal manera que se obtuviera una modificación de los programas de señal con generación flexible a través de un mecanismo ON _LINE.

Para lograr dicho objetivo se efectuaron simulaciones, a partir de la utilización del software Vissim 5.30, junto con la formulación de un algoritmo propio y específico realizado en el lenguaje de programación VAP, que permitiera la modelación del tramo del corredor de la Avenida 43A seleccionado para la evaluación, en las condiciones más cercanas a la realidad, para el efecto se ejecutaron múltiples "corridas" de las cuales se eligieron las 5 de mayor significación, a fin de que pudieran representar a través del modelo las condiciones más cercanas posibles a la realidad, si se migrase a este tipo de tecnologías. Consecuentemente con esto, las variables más sensibles en cada una de las simulaciones realizadas estuvieron basadas en el grado de ocupación de los detectores sobre la vía principal y la vía secundaria, el tiempo de verde mínimo, y la creación de minifases según la activación de la demanda vehicular a través de los detectores.

De las 5 simulaciones elegidas, se escogió la que mayor eficiencia otorgaba a la red en términos de disminuir las demoras promedio en las intersecciones, reducir los tiempos de viaje, controlar las longitudes de cola, eliminar las deficiencias en la coordinación; y de esta manera lograr un mejor uso de las reservas de capacidad en las intersecciones. Lo anterior, teniendo en cuenta que el algoritmo para el control adaptativo es sensible a la disminución de la densidad de tránsito, al aumentar la separación de los vehículos, cediendo el paso a la calle transversal.

También reacciona cuando vuelven a aparecer vehículos más juntos entre sí, para volver el verde a la vía principal. El resultado natural es lograr un movimiento coordinado a una velocidad y espaciamiento naturales dentro de las condiciones imperantes de movilidad del corredor vial estudiado.

En consecuencia, se presenta a continuación los resultados de desempeño de los parámetros de un modelo diseñado con estrategia de control adaptativo, para la hora punta del día:

- Para la red evaluada, el total del número de vehículos activos en la red al final del período de simulación (período comprendido por 3.600 segundos), corresponde al parámetro denominado número de vehículos en la red **"Number of vehicles in the network,"** que para el caso es de 353 vehículos. (Esta cifra no incluye los vehículos que ya llegaron y partieron hacia su destino, ni la demanda latente).

- El número total de vehículos que han salido de la red hacia su destino final durante el período de análisis corresponde a 6.506 vehículos. En VISSIM dicho indicador tiene por leyenda **"Number of vehicles that have left the network".** Lo que significa, que este tipo de control ON LINE procesa un mayor número de vehículos (6.506) al compararse frente a los que se logran evacuar mediante un control semiactuado (6.350 vehículos), lo que representa aproximadamente un 2,5% más, frente al sistema actualmente instalado en el sitio.

- Con referencia al parámetro demanda latente **"Latent demand",** este expresa el número de vehículos que no pueden entrar a la red ya sea a través de los ingresos/accesos a la malla vial o por estacionamientos. El modelo los estima y son del orden de 1.251 vehículos, en efecto, es el número de vehículos que al final de la simulación están esperando entrar a la malla vial y no son contados como vehículos activos. Por tanto, si este indicador se compara con los resultados de un control semiactuado, se presenta un 13% de disminución del número de vehículos, que al final de la simulación están esperando entrar a la malla vial.

- La evaluación de toda la red bajo estrategia de control adaptativo arroja un valor de 118,70 horas para el indicador de efectividad **"Latent delay time [h]".** Este se interpreta como el tiempo total de espera de todos los vehículos, que no podrían entrar a la red inmediatamente. Así mismo, Incluye el tiempo de espera de los vehículos que han ingresado en la red antes del final de la simulación.

De todo lo anterior se tiene:

- Como bien sabemos, el volumen total de vehículos ingresados a la red y procesados por el modelo corresponde a 6.337 vehículos durante 3.600 segundos de

simulación. El valor medido mediante aforos vehiculares fue de 7.471 vehículos. No obstante, se debe tener presente que las condiciones de borde hacen más real el modelo, aunque al mismo tiempo lo limitan, debido a que los extremos norte y sur de la red evaluada corresponden a los cruces semaforizados de la Avenida el Poblado a la altura de las calles 5A-7 y 4Sur-5Sur respectivamente, los cuales para el modelo operan mediante control de tiempo fijo.

- De otro lado, y con base en el modelo:

  La suma (vehículos activos + vehículos procesados + los vehículos que llegan) = 8.110.

  Valor que corresponde a la demanda total de los vehículos, introducida arco por arco, o a través de matrices para el período de simulación. (8110 vehículos)

Es relevante recordar, que en realidad al evaluar la red para el período de la hora de máxima demanda, se incluyo dentro de la calibración del modelo una etapa denominada de precalentamiento la cual consistió en alimentar el modelo con volúmenes vehiculares durante 15 minutos adicionales y previos, a los 60 minutos evaluados en la hora punta. Lo anterior con el fin de lograr obtener un modelo lo más ajustadamente real a las condiciones de movilidad del tramo evaluado en la hora de mayor congestión.

Siguiendo con el análisis de los demás indicadores de efectividad del modelo con control adaptativo, se observa:

- La distancia total recorrida de los vehículos procesados en la red (los que ya salieron al final de la simulación) más los activos corresponde a un valor 4.577,0 km. Este parámetro en VISSIM es denominado **"Total Distance Traveled [km]"**. De lo anterior, se infiere que no todos los vehículos tienen una trayectoria de travesía, parte de ellos utiliza la subred vial evaluada para acceder o salir del sector comercial, de negocios y/o residencial. Ver Tablas 44, 45 y 46.

- El modelo arroja un resultado de 353,5 horas, para el indicador de efectividad rotulado **"Total travel time [h]",** y significa el tiempo total de viaje de todos los vehículos activos y que han llegado a red evaluada.

- Se reporta un valor de velocidad en el modelo de 13 km/h, para el parámetro denominado **"Average speed [km/h]",** que representa la velocidad media como la distancia total/Tiempo total de viaje.

- El Parámetro llamado tiempo de demora total **"Total delay time [h]",** expresa el tiempo total de demora de todos los vehículos activos dentro de la red y de todos los vehículos que han llegado a la red. El tiempo de demora incluye las demoras por

paradas de los vehículos, pero no incluye el tiempo de permanencia del bus en los puntos autorizados de parada (Bahías de buses, etc). Aparcamientos en cualquier tipo de estacionamiento tampoco están incluidos. Corresponde a un valor de 248,8 horas. Ver tabla 45.

- El modelo arroja un resultado de 130,61segundos/vehículo, para el parámetro que expresa el tiempo de demora promedio por vehículo y cuya leyenda es **"Average delay time per Vehicle [s]".** Este parámetro explica la demora promedio por vehículo en la red evaluada como:

Ecuación 31. $$\text{Average delay time per Vehicle}[s] = \frac{\text{Total delay time}}{veh_activos + veh_llegaron}$$

- El modelo indica un resultado de 144,46 horas con respecto al indicador demora total por parada para todos los tipos de vehículos de la red evaluada, este parámetro corresponde a la etiqueta denominada **"Total Stopped delay [h], All Vehicle types",** y se explica como el total de tiempo detenido de todos los vehículos activos y de los vehículos que han llegado. Estrictamente el tiempo de demora es igual al tiempo cuando los vehículos están completamente detenidos y su velocidad es cero. Se resalta que el tiempo de permanencia del bus sobre una parada autorizada no está incluido, y aparcamientos en cualquier tipo de estacionamiento tampoco están incluidos.

- Para el software de microsimulación VISSIM, el indicador de efectividad denominado **"Average stopped delay per Vehicle [segundos]**", caracteriza el total del número de paradas tanto de todos los vehículos activos, como de todos los vehículos que han llegado a la red. El modelo con estrategia de control adaptativo reporta un resultado de 75,82 segundos/vehículo. Ver tabla 45. Su expresión matemática es:

Ecuación 32. $$\text{Average_ stopped_ delay per Vehicle}[s] = \frac{\text{Total_ stopped_ delay}}{veh_activos + veh_arrived}$$

- Con respecto al parámetro llamado **"Number of stops, all Vehicle types",** representa el número de paradas de todos los vehículos activos y los vehículos que han llegado a la red. Para el modelo se obtuvo un valor de 25.011 paradas durante el período de simulación de la hora de máxima demanda.

- El desempeño para todos los vehículos de toda la red evaluada en cuanto al indicador cuya leyenda corresponde "**"Average number of stops per vehicles",**

indica el número promedio de paradas por vehículo con un valor de 3,65 paradas/vehículo**".** Su expresión matemática está dada por:

Ecuación 33. $$\text{Average_ number_ of_stops_per Vehicle} = \frac{\text{Total_ number_ of_stops}}{veh_activos + veh_arrived}$$

En la actualidad, las mediciones directas en línea no son una práctica común en Colombia debido a los grandes esfuerzos relacionados. Las tablas 44, 45, y 46, expresan y resumen los indicadores de desempeño de la malla vial evaluada por microsimulación, para la hora de máxima demanda vehicular, para un sistema de control adaptativo.

Coherentemente con los resultados anteriormente expuestos, para un modelo que opere mediante control adaptativo, se comprueban las hipótesis de investigación que se lanzaron al inicio del estudio:

La puesta en escena pasa de presumir a nivel de hipótesis, y logra evidenciar cuantitativamente que utilizar modelos con estrategias de control sensible al tráfico con soluciones de coordinación flexible en función de la demanda, constituye una de las medidas técnicas más adecuada para enfrentar el problema de la congestión y seguridad en las intersecciones semaforizadas, debido a que una adecuada temporización para cada cruce proporciona una óptima temporización global para la red de semáforos analizada. Obteniéndose como resultado, beneficios en el incremento de la velocidad media y mejores indicadores de desempeño de la red vial urbana. Socialmente contribuye a reducir costos de operación de la ciudad, al generar economías de escala. (Ver tablas 44, 45 y 46).

Los estudios de las redes de semáforos con procesos "On Line", son bastante complejos de abordar, sin embargo la presente investigación logro llevar la demora media a valores mínimos dentro de las condiciones imperantes del tráfico; minimizar los tiempos de espera dio lugar a ahorros de tiempo para usuarios, menos pérdidas macro-económicas, aceptación de control de señales de tráfico y reducción de las emisiones de gases. De igual manera, minimizar el número de paradas conduce a una mejora en la comodidad de conducción, sobre todo para los buses, baja probabilidad de colisiones traseras, reducción de consumo de combustible, y reducciones de emisiones de escape y ruido. (El software Vissim es robusto y puede incorporar parámetros ambientales, sin embargo éstos no se midieron en campo, por no hacer parte de la presente investigación).

La tabla 44, presenta la evaluación de nodos y links del control adaptativo.

Tabla 44. Evaluación de nodos y links control adaptativo

Subred vial evaluada: Avenida Poblado (Cr43A) entre Cl 5A- 7 y Cl 4Sur - 5Sur

Período evaluado: hora pico 17:45- 18:45

Intersección	Node	tStart	tEnd	Movement	veh_All	aveQueue	maxQueue	Delay	tStopd	Stops	EmissCO	EmissNOx	EmissVOC	FuelCons	Nivel de servicio
Carrera 43A con calle 5A - 7	**Acceso SurEste**														
	1	900	4500	SE-N	310	29,61	95,93	73,39	54,29	2,16	685,41	133,36	158,85	9,81	E
	1	900	4500	SE-NE	51	29,61	95,93	58,69	39,84	1,92	97,22	18,92	22,53	1,39	E
	1	900	4500	SE-S	437	29,61	95,93	44,17	34,13	1,05	552,51	107,50	128,05	7,90	D
	Acceso W														
	1	900	4500	W-NE	408	166,28	204,04	97,52	80,51	1,60	944,01	183,67	218,78	13,51	F
	1	900	4500	W-N	13	166,28	204,04	117,92	92,87	1,85	34,06	6,63	7,89	0,49	F
	1	900	4500	W-S	94	166,28	204,04	127,38	103,43	2,53	295,08	57,41	68,39	4,22	F
	Acceso N														
	1	900	4500	N-S	31	118,09	187,67	71,90	46,67	1,90	56,48	10,99	13,09	0,81	E
	1	900	4500	N-S	1362	118,09	187,67	59,19	36,63	1,71	2536,77	493,56	587,92	36,29	E
	1	900	4500	N-NE	182	166,28	204,04	62,24	38,14	1,91	362,63	70,55	84,04	5,19	E
	1	900	4500	N-W	56	43,24	139,50	36,40	19,46	1,00	64,45	12,54	14,94	0,92	D
	1	900	4500	N-N	92	166,28	204,04	68,15	42,25	2,00	190,47	37,06	44,14	2,72	E
Carrera 43A con calle 3.	**Acceso W**														
	2	900	4500	W-S	182	7,28	81,03	26,50	16,44	1,19	183,69	35,74	42,57	2,63	D
Carrera 43A con calle 1Sur	**Acceso E**														
	3	900	4500	E-S	399	10,62	46,60	36,01	25,25	0,96	452,02	87,95	104,76	6,47	D
	3	900	4500	E-N	293	12,32	97,26	28,41	21,03	0,64	260,34	50,65	60,34	3,72	C
Carrera 43A con calle 1A Sur	**Acceso W**														
	4	900	4500	W-S	79	1,26	28,18	13,56	7,92	0,99	64,40	12,53	14,92	0,92	B
Carrera 43A con calles 4Sur y 5Sur	**Acceso NW**														
	6	900	4500	NW-SE	73	83,43	123,96	174,41	140,86	3,04	301,69	58,70	69,92	4,32	F
	6	900	4500	NW-S	96	83,43	123,96	151,47	118,27	2,85	357,57	69,57	82,87	5,12	F
	6	900	4500	NW-NE	185	83,43	123,96	212,39	171,36	3,68	915,49	178,12	212,17	13,10	F
	Acceso SE														
	6	900	4500	SE-NW	47	104,82	129,00	279,79	215,20	5,79	319,58	62,18	74,07	4,57	F
	6	900	4500	SE-SW	73	104,82	129,00	279,09	219,12	5,19	460,65	89,62	106,76	6,59	F
	6	900	4500	SE-S	44	104,82	129,00	298,06	228,38	6,05	221,15	43,03	51,25	3,16	F
	6	900	4500	SE-NE	91	104,82	129,00	257,64	198,16	4,84	534,48	103,99	123,87	7,65	F
	Acceso SW														
	6	900	4500	SW-NW	9	34,92	120,63	67,77	39,31	1,89	19,05	3,71	4,42	0,27	E
	6	900	4500	SW-SE	153	34,92	120,63	22,53	8,64	0,67	130,39	25,37	30,22	1,87	C
	6	900	4500	SW-SW	34	34,92	120,63	61,01	39,69	2,21	70,20	13,66	16,27	1,00	E
	6	900	4500	SW-NE	1562	34,92	120,63	26,41	10,21	0,93	1516,29	295,02	351,42	21,69	C
Centro Comercial San Fernando Plaza	**Acceso SE**														
	7	900	4500	SE-N	145	18,31	85,46	85,17	67,63	3,08	401,93	78,20	93,15	5,75	F

NOTA: Para las intersecciones de la Avenida el Poblado con calle 3, calle 1A Sur y Centro Comercial San Fernando Plaza su nivel de servicio se califico en base al HCM, para intersecciones no semaforizadas. Las demás fueron evaluadas igualmente con el HCM para intersecciones controladas con semáforos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Desempeño de red control adaptativo

Subred vial evaluada: Avenida Poblado (Cr43A) entre Cl 5A - 7 y Cl 4Sur - 5Sur
Período evaluado: hora pico 17:45- 18:45

Network Performance Estrategia de Control Adaptativo	
Alternativa elegida	
Parameter - (Simulation time from 900.0 to 4500.0)	**Value**
Average delay time per vehicle [s], All Vehicle Types	130,61
Average number of stops per vehicles, All Vehicle Types	3,65
Average speed [km/h], All Vehicle Types	13
Average stopped delay per vehicle [s], All Vehicle Types	75,82
Total delay time [h], All Vehicle Types	248,85
Total Distance Traveled [km], All Vehicle Types	4.577,06
Evaporation [kg], All Vehicle Types	-
Emissions Benzene [kg], All Vehicle Types	-
Emissions CO [kg], All Vehicle Types	-
Emissions CO2 [kg], All Vehicle Types	-
Emissions HC [kg], All Vehicle Types	-
Emissions NMHC [kg], All Vehicle Types	-
Emissions NMOG [kg], All Vehicle Types	-
Emissions NOx [kg], All Vehicle Types	-
Emissions Particulates [kg], All Vehicle Types	-
Emissions SO2 [kg], All Vehicle Types	-
Emissions Soot [kg], All Vehicle Types	-
Fuel Consumption [kg], All Vehicle Types	-
Latent delay time [h], All Vehicle Types	118,70
Latent demand, All Vehicle Types	1251
Number of Stops, All Vehicle Types	25011
Number of vehicles in the network, All Vehicle Types	353
Number of vehicles that have left the network, All Vehicle Types	6506
Total stopped delay [h], All Vehicle Types	144,46
Total travel time [h], All Vehicle Types	353,53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Resultados evaluación del desempeño control adaptativo

Subred vial evaluada: Avenida Poblado (Cr43A) entre Cl 5A - 7 y Cl 4Sur - 5 Sur
Período evaluado: hora pico 17:45- 18:45

Algoritmo de control Adaptativo para Medellín	Prueba de ubicación	Resultados
SACOT	Colombia Antioquia Medellín. Avenida el Poblado entre calles 5A-7 y 4Sur- 5Sur.	**10%** de disminución en el número promedio de paradas por vehículo, para todos los tipos de vehículos evaluados en la red. (Average number of stops per vehicles)
		9% en la reducción de las demoras promedio por vehículo. (Average delay time per Vehicle)
		7% de mejoramiento en la velocidad promedio de desplazamiento. Esto conlleva un incremento del 4% en la distancia total recorrida de los vehículos procesados en la red (los que ya salieron al final de la simulación) más los activos.
		12% de disminución en el número de paradas tanto de los vehículos activos en la red, como de todos los vehículos que han llegado a la red. (Average stopped delay per Vehicle)
		7% de disminución del tiempo total de demora (Total delay time) de todos los vehículos activos dentro de la red y de todos los vehículos que han llegado a la red. No incluye el tiempo de permanencia del bus/tranvía en los puntos autorizados de parada (Bahías de buses, etc); ni aparcamientos en cualquier tipo de estacionamiento.
		Reducción del tiempo total de viaje hasta un **4%.** (Total travel time)
SACOT	Colombia Antioquia Medellín. Avenida el Poblado entre calles 5A - 7 y 4Sur -5Sur.	**2%** de incremento en el número total de vehículos que han salido de la red hacia su destino final durante el período de análisis. (Number of vehicles that have left the network).
		13% de disminución del número de vehículos que al final de la simulación están esperando entrar a la malla vial y no son contados como vehículos activos. (Latent demand).
		19% de reducción del tiempo total de espera de los vehículos que no podrían entrar a la red inmediatamente. (Latent delay time [h]).

Fuente: Elaboración propia con base en el software de microsimulación VISSIM y lenguaje de programación VAP.

Con base en lo anterior, el modelo logra explicar el comportamiento del tráfico si se llegará a migrar hacia tecnologías On Line; y se comprueba que un control dinámico, mejora el flujo del tráfico, evitando cuellos de botella. La aplicación de estrategias de control adaptativo durante las horas pico, por lo general ayuda a

reducir el período de la sobrecarga en una intersección, como se observa en los resultados finales de los indicadores de desempeño de la red evaluada consignados en las tablas 45, 46 y 47.

Tabla 47. Comparativo desempeño de red vial por microsimulación

Subred vial evaluada: Avenida Poblado (Cr43A) entre Cl 5A-7 y Cl 4Sur-5Sur
Período evaluado: hora pico 17:45- 18:45

Network Performance			
Comparativo indicadores de desempeño			
Simulation time from 900.0 to 4500.0.	**Estrategia Control Semiactuado**	**Estrategia Control Adaptativo**	**Comparativo porcentual**
PARAMETER	**VALUE**	**VALUE**	**%**
Average delay time per vehicle [s], All Vehicle Types	142,76	130,61	-9%
Average number of stops per vehicles, All Vehicle Types	3,99	3,65	-10%
Average speed [km/h], All Vehicle Types	12	13	7%
Average stopped delay per vehicle [s], All Vehicle Types	85,12	75,82	-12%
Total delay time [h], All Vehicle Types	266,04	248,85	-7%
Total Distance Traveled [km], All Vehicle Types	4.400,50	4.577,06	4%
Evaporation [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions Benzene [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions CO [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions CO2 [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions HC [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions NMHC [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions NMOG [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions NOx [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions Particulates [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions SO2 [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Emissions Soot [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Fuel Consumption [kg], All Vehicle Types	-	-	-
Latent delay time [h], All Vehicle Types	140,81	118,70	-19%
Latent demand, All Vehicle Types	1418	1251	-13%
Number of Stops, All Vehicle Types	26786	25011	-7%
Number of vehicles in the network, All Vehicle Types	359	353	-2%
Number of vehicles that have left the network, All Vehicle	6350	6506	2%
Total stopped delay [h], All Vehicle Types	158,62	144,46	-10%
Total travel time [h], All Vehicle Types	366,43	353,53	-4%

NOTA: Para los indicadores de efectividad, el valor negativo (rojo), advierte una reducción en el porcentaje de cada uno de los parámetros referenciados, que se traduce en un mejoramiento de las condiciones del sistema de la red evaluada, con un control adaptativo.

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Resultados con modelos de control adaptativo en otros países

En la literatura especializada han sido probadas una amplia gama de mejoras en el desempeño para la aplicación de estos sistemas. Si bien las técnicas de ensayo varían, la base de referencia para estas pruebas por lo general, ha sido sistemas predeterminados, con variación considerable en los planes de tiempo del día. La siguiente tabla, proporciona una muestra representativa de los resultados obtenidos de esta manera. Los mayores beneficios se producen en aquellas situaciones donde se experimentan variaciones significativas del tráfico con respecto a un plan previamente predeterminado. Ejemplos incluyen eventos especiales sobre arterias, y desviación de tráfico de las autopistas durante los incidentes.

Tabla 48. Resultados pruebas de desempeño en otros países

Algoritmo de control Adaptativo	Prueba de ubicación	Resultados
OPAC	Norte de Virginia	5.6% de mejora en las paradas y las demoras [1]
SCATS	Condado de Oakland, Michigan,	Promedio de la reducción de demoras 7,8 % [2]
	Newark, Delaware	Reducción del tiempo de viaje hasta un 25% [2]
SCOOT	Minneapolis, Minnesota,	Reducción de la demora de hasta un 19% durante los eventos especiales [2]
	Toronto, Ontario	8% de disminución en el tiempo de viaje, 17% de disminución de los retraso [3]
	Durban, Sudáfrica,	7% de reducción de tiempo de viaje [4]

[1] Gartner, NH, FJ Poorhan, y CM Andrews. "Implementaciones y Pruebas de Campo de la OPAC para estrategias de control adaptativo RT-TRACS". Presentado en la 81 ª Reunión Anual de la Transportation Research Board, Washington, DC, 2002.
[2] Sussman, J. "¿Qué hemos aprendido sobre Sistemas Inteligentes de Transporte." Capítulo 3, Federal Highway Administration Report No. FHWA-OP-01-006, diciembre de 2000.
[3] "SCOOT in Toronto." Traffic Technology, Spring 1995.
[4] "Durban SCOOT System." The Durban Metro Council, Durban, South Africa, February 27, 1996.

Fuente: Departamento de Transporte Federal de Carreteras
Federal Highway Administration. EEUU. Año 2005

5. CONCLUSIONES

De la investigación llevada a cabo se pueden extraer conclusiones de carácter general que permiten visualizar el tipo de herramientas tecnológicas necesarias o requeridas para la gestión del tráfico de Medellín, con las debidas adaptaciones al medio, a través de la implementación de potentes sistemas capaces de realizar un reparto óptimo de las fases de los semáforos que gobiernan el tráfico de una red vial. De la misma forma se extraen conclusiones con respecto a la pertinencia de la utilización de estrategias de control adaptativo como los mecanismos de mayor utilidad, en este sentido se concluye:

- Es necesario diseñar, modelar e implementar sistemas que hagan uso de capacidades típicas de los sistemas de inteligencia artificial con adaptabilidad al medio con el que interactúan, procesos de razonamiento para planificar las tareas a realizar ante situaciones no previstas, o flexibilidad en su comportamiento y que, al mismo tiempo, sigan garantizando las restricciones temporales de las tareas de tiempo real crucial. Al intentar resolver estas dos necesidades se observa que las capacidades para la resolución de problemas complejos, típicos de las técnicas de inteligencia artificial, se basan en la utilización de mecanismos con tiempos de ejecución *no deterministas*, que van de la mano con la propia naturaleza del fenómeno vehicular, pues éste, lejos esta de poder ser enfocado desde la perspectiva de un modelo determinista y todo ello porque siempre estará presente el componente humano que genera alto grado de incertidumbre, el problema que aparece es que en la actualidad en la mayoría de los casos las soluciones al tránsito vehicular están fundamentadas en modelos determinísticos en vez de estocásticos.

  Consecuentemente, esta interpretación permite introducir inteligencia; se hace un llamado a las autoridades locales en materia de tránsito y transporte para que migren sus estrategias de control hacia tecnologías en tiempo real que mediante la utilización de controles y algoritmos adecuados permitan mejorar el comportamiento global del sistema vial.

- Desde la perspectiva del control de la movilidad, es pertinente considerar que los aumentos de capacidad física, mediante nuevas infraestructuras, tienden, en general a resolver sólo en el corto plazo los desequilibrios entre oferta y demanda vial, dado que la demanda pronto tiende a expresarse en toda su magnitud, (crece bajo variables relacionadas con el ingreso) atraída por una operación más fluida y expedita. De esta forma, la congestión tiende a reproducirse en niveles de mayor flujo, tendencia que, de consolidarse, termina por comprometer el espacio público en beneficio del transporte motorizado. Ante estas circunstancias para la ciudad de

Medellín, es imperativo dar respuesta a su movilidad con políticas sostenibles de gestión y control del tránsito que constituyen una acción intermedia que permite optimizar la infraestructura con soluciones de mayor contenido tecnológico, basadas en procesos "On Line" que realicen diferentes propuestas de temporizaciones, trasladadas eficazmente a la vía, lo cual también podría ser aplicado en otras ciudades del mundo.

- Del estudio se infiere el hecho, de que en el caso de estrategias sensibles al tránsito, bajo condiciones no saturadas, la aplicación de éstas resulta en la optimización de los retardos, y paradas, mientras que en condiciones saturadas procura maximizar la capacidad. También se quiere expresar que la flexibilidad obtenida en relación a la demanda, sobre la definición de la función de costos y beneficios, en otros países ha incentivado el desarrollo de esta estrategia incluso para ser implementada en ambientes con prioridad para buses. Sin embargo, antes de comprar la tecnología necesaria para ser instalada en toda la ciudad, se deben tener mayores elementos de juicio y modelar otros corredores. Adicionalmente también se deberá realizar un análisis de mayor detalle de los costos iníciales de inversión, los costos de operación, dichos costos dependerán del grado de inteligencia de la estrategia a implementar, de la tecnología a usar en la detección y del sistema de comunicaciones para lo cual se recomienda realizar un análisis beneficio/costo, que determine las ventajas económicas de su utilización.

- Como conclusión final se presenta el hecho de que Medellín hace parte de una conurbación ubicada en un valle estrecho que tiene una longitud de 60 km, es una ciudad conformada por 2,2 millones de habitantes aproximadamente, que hace parte de una región metropolitana de 3,5 millones de habitantes. Esta región soporta al día una movilidad diaria de cerca de 5 millones de viajes distribuidos en bicicleta 1%, bus de empresa y escolar 4%, a pie 28%, moto 5%, Metro 9%, taxi 10%, auto 13%, bus-buseta-microbús 30%. La movilidad en transporte público colectivo en su gran mayoría se hace mínimo en 2 modos, lo que exige una integración, esto marca la diferencia con ciudades pequeñas. Por tanto una ciudad con tan altos viajes al día no puede seguir siendo manejada con estrategias de control utilizadas en ciudades relativamente pequeñas como Pereira, Manizales o Ibagué. Debido a que ese tamaño fue rebasado ampliamente, puesto que en la ciudad de Medellín convergen demandas vehiculares no solo inherentes a la movilidad de Medellín, sino propias de la ciudad región compuesta por tres pisos Valle de Aburrá, Valle de San Nicolás, y la zona occidental. Adicionalmente el corredor vial evaluado también atiende demandas vehiculares del orden departamental.

  Por tanto la Administración del municipio de Medellín tendrá que asumir nuevos retos y migrar hacia nuevas tecnologías que posibiliten un desarrollo propicio cuando se trata de ciudades con este tipo de tamaño, a través de tecnologías de vanguardia que permitan controlar la movilidad en tiempo real con sistemas flexibles, mediante algoritmos dinámicos que posibiliten ello.

RECOMENDACIONES

- Cuando se analicen Sistemas de Control de Tráfico Adaptativo en redes urbanas de semáforos con espaciamientos cercanos entre una y otra intersección, es factible emplear este tipo de control, puesto que puede implicar no interrupciones imprevistas de la ola verde y un no exceso de congestión, lo que conlleva a eliminar deficiencias en la coordinación debido a las restricciones, mejor control de longitud de cola, y un alto uso de las reservas de capacidad en cada una de las intersecciones, optimizando por consiguiente la velocidad de operación del transporte público y del transporte particular.

- A pesar de que la modelación y aplicación de Estrategias de Control Sensibles al Tránsito son bastante complejas, basados en la presente investigación, éstas constituyen una aplicación efectiva en el manejo de intersecciones con grandes volúmenes de tránsito, que pueden ser operadas eficientemente con un buen diseño. Esto se evidenció al lograr hacer frente al manejo de un alto volumen de tráfico sobre el corredor vial arterial de la Avenida el Poblado entre calles 5A-7 y 4Sur-5Sur, lo cual se reflejó cuantitativamente y cualitativamente a través de los indicadores de efectividad con un mejor rendimiento de los parámetros de operación de la red vial evaluada.

- Con base en esta investigación se da un reconocimiento a los Sistemas de Control de Tráfico Adaptativo en el sentido de producir un alivio de la congestión del tráfico urbano durante la hora de máxima congestión, mejorando el rendimiento de los indicadores de movilidad dentro del tramo vial particularmente estudiado, es decir, se comprueba que al modelar redes de semáforos donde se mezclan varias estrategias de control, la tecnología On_Line funciona adecuadamente, bien sea si se tienen de manera cercana intersecciones controladas con pare, con estrategia de control fijo, y/o con estrategia de control semiactuado (control responsivo). Lo anterior se evidencia en el ejercicio desarrollado a través de las condiciones de borde expuestas para el modelo (intersecciones de los extremos de la malla vial controlados mediante estrategia de tiempo fijo), y de las intersecciones controladas con pare que están localizadas de manera muy próxima a las intersecciones manejadas con un Sistema de Control Adaptativo.

- Es importante recalcar que las aplicaciones mediante control con estrategias sensibles al tráfico en países desarrollados, tienen una connotación distinta a si se aplicasen en países en vía de desarrollo, porque a pesar de que en ambos casos se logre disminuir la congestión, las aplicaciones de estos sistemas en las grandes ciudades de los países en vía de desarrollo son únicas, debido a que éstas ciudades se enfrentan a problemas de transporte más graves que las ciudades de países desarrollados, dado que tales ciudades están creciendo mucho más rápido que las de los países desarrollados. La media de crecimiento anual de población en los países en desarrollo se estima alrededor del cinco por ciento en comparación con el 0,7 por ciento en los países desarrollados. Por lo que su aplicación tiene mayor grado de complejidad.

GLOSARIO

AC
Autómatas Celulares
AI
Inteligencia Artificial
ANN
Algoritmo Red Neuronal Artificial
ALGORITMOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.
(En inglés: AI-Artificial Inteligence) incluyen algoritmos de Red Neural Artificial (ANN), el algoritmo de Lógica Compleja, y el algoritmo combinado de Lógica Compleja.
ALGORITMOS DE LÓGICA COMPLEJA.
Estos algoritmos incorporan razonamientos inexactos e inciertos en la lógica de detección de incidentes. Diseñado para tomar decisiones cuando los datos son imprecisos o faltan, éstos aproximan el razonamiento desarrollando límites erráticos en el análisis del algoritmo.
ALGORITMOS DE RED NEURAL ARTIFICIAL
(En inglés: ANN - Artificial Neural Network). Las redes neurales se utilizan para simular el proceso de pensamiento de la mente humana, y se pueden tomar diferentes vías para llegar a una decisión. Una red neural consiste en varios elementos de procesamiento simples (PEs) que tienen interconexiones paralelas muy densas. Un solo elemento de procesamiento puede recibir información, pesada en la fuerza de los valores de la conexión asociada, de muchos otros elementos y puede rápidamente comunicar los resultados a muchos otros elementos.
ALGORITMOS MACROSCÓPICOS.
Hacen sus decisiones basándose en variables macroscópicas tales como densidad de tráfico, media de velocidad espacio, media de tiempo de viaje.
ALGORITMOS MESOSCÓPICOS.
Los modelos mesoscópicos presentan una aproximación intermedia entre los microscópicos y los macroscópicos en la medida en que mezclan conceptos y herramientas de ambos modelos al analizar el comportamiento de grupos de conductores.
ALGORITMOS MICROSCÓPICOS.
Considera el movimiento individual de cada vehículo y las interacciones entre ellos. En adición a la geometría, algunas consideraciones especiales del comportamiento

de los conductores pueden ser tenidas en cuenta en la relación flujo - densidad vehicular.

ASTRID

Base de datos de información del tráfico automático SCOOT.

ATCS

Sistemas de Control de Tráfico Adaptativo

ATMS

Sistemas Avanzados de Gestión de Tránsito

AVL

Sistemas Localización Automática Vehículos

CAD.

Despacho computarizado (en inglés: CAD - Computer-Aided Dispatch)

CCTV

Circuito Cerrado de Televisión (en inglés CCTV - Closed Circuit Television)

CTU

Control del Tráfico Urbano

FCs

Floating Cars (Técnica de carros flotantes)

FRED.

Demostración en tiempo real del Sistema Experto de Autopista (en inglés: FRED - Freeway Real-Time Expert System Demostration)

GPS.

(En inglés: GPS - Global Positioning Systems). Sistemas de Posicionamiento Global.

ITS

Tecnología Sistemas Inteligentes

IVP

Inductive Vehicule Priority

LAV

Localización Automática de Vehículos

MLF

Estructura de alimentación de niveles múltiples de una Red Neuronal Artificial

PEs

Elementos de procesamiento simple

PNN

Red Neuronal probabilística

RdP

Redes de Petri, teoría matemática para modelar sistemas no determinísticos.

RNA

Red Neuronal artificial

SCATS

Sydney Coordinated Adaptive Traffic System; (De origen Australiano).

SCOOT

Split Cycle Offset Optimization Technique; Control Adaptativo (Londres)

SMV
Señales de mensaje variable
SPLIT
Selective Priority to Late buses Implemented at Traffic signals
SPOT
Señal de control adaptable, Basado en UTOPIA (Goteburgo)
STEP
Programa de prueba y evaluación de SCOOT.
UCR
Unidad de comunicación remota
UTCS
Sistemas Control de Tráfico Urbano
UTOPIA
Señal de control adaptable (Turín)
VisVAP
Lenguaje de tráfico adaptativo. Desarrollado por PTV VISSIM, Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. $\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} = 0$ 30

Ecuación 2. $\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + vg\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} = 0$ 30

Ecuación 3. $V_{JAM} = -(V_2 - V_1)(\frac{\rho_1}{\rho_2}) + V_1$ 30

Ecuación 4. $Vi(t+\tau)\alpha\Delta x_i(t)$ 32

Ecuación 5. $a_i(t+\tau)\alpha\Delta v_i(t)$ 32

Ecuación 6. $a_i(t+\tau) = C_1\frac{[V_i(t)]^m}{[\Delta x_i(t)]^l}\Delta v_i(t)$ 32

Ecuación 7. $\dot{v} = \alpha \cdot (V(\Delta x) - v)$ 33

Ecuación 8. $\dot{v}(t) = \alpha[V(\Delta x(t-\tau)) - v(t)]$ 33

Ecuación 9. $umbral\alpha\frac{\Delta v}{\Delta x^2}$ 34

Ecuación 10. $\frac{\partial p}{\partial t} + v\frac{\partial p}{\partial x} = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{acc} + \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{int}}$ 35

Ecuación 11. $\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{int}} = (1-\Pi)\,p(x,v,t)\int(w-v)\,p(x,w,t)\partial w$ 35

Ecuación 12. $\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{acc} = \left[\frac{\partial(p*(v^0(v/x,t)-v)/\tau}{\partial v}\right]$. 35

Ecuación 13. $\frac{\partial p_u}{\partial t} + v\frac{\partial p_u}{\partial x} = \left(\frac{\partial p_u}{\partial t}\right)_{acc} + \left(\frac{\partial p_u}{\partial t}\right)_{\text{int}}$ 36

Ecuación 14. $\left(\frac{\partial p_u}{\partial t}\right)_{acc} = \left[\frac{(p_u(v^0 - v)/\tau_u}{\partial v}\right]$ 36

Ecuación 15. $\left(\frac{\partial p_u}{\partial t}\right)_{\text{int}} = -(1-\Pi_u)\sum_s(I_{u,s}(x,t) - R_{u,s}(x,t))$ 36

Ecuación 16. $I_{u,s}(x,t)=\int_{w<v}\left|\ w-v\ \right|p_u(x,v,v^0,t)\,p_s(x,w,w^0,t)\partial w\partial w^0$ 36

Ecuación 17. $R_{u,s}(x,t)=\int_{w>v}\left|\ w-v\ \right|p_u(x,w,v^0,t)\,p_s(x,v,w^0,t)\partial w\partial w^0$ 36

Ecuación 18. $\frac{\partial p_{(u,j,c)}}{\partial t}+v\frac{\partial p_{(u,j,c)}}{\partial x}=\left(\frac{\partial p_{(u,j,c)}}{\partial t}\right)_{acc}+\left(\frac{\partial p_{(u,j,c)}}{\partial t}\right)_{int}+\left(\frac{\partial p_{(u,j,c)}}{\partial t}\right)_{ILC}+\left(\frac{\partial p_{(u,j,c)}}{\partial t}\right)_{CLC}$ 36

Ecuación 19. $s_j\sum_{i=1}^{m}\alpha_{ij}\lambda_i\geq d_j\,\forall_j$,.....38

Ecuación 20. Espaciamiento medio $s=\frac{\sum si}{N}=\frac{L}{N}=\frac{1}{k}$ 54

Ecuación 21. Intervalo medio $h=\frac{\sum hi}{N}=\frac{T}{N}=\frac{1}{q}$,.....54

Ecuación 22. $q=k.v$ 54

Ecuación 23. $N=\frac{(K*S)^2}{E^2}$ 64

Ecuación 24. $d=ax+bx$ 89

Ecuación 25. $bx=(bx_add+bx_mult*z)*\sqrt{v}$ 89

Ecuación 26. $p=\frac{1}{1+e^{-\alpha-\beta_1 v-\beta_2 dx}}$ 91

Ecuación 27. $GEH=\sqrt{\frac{(E-V)^2}{(E+V)/2}}$ 91

Ecuación 28. $\text{Average delay time per Vehicle[s]}=\frac{\text{Total delay time}}{veh_activos+veh_llegaron}$ 109

Ecuación 29. $\text{Average_ stopped_ delay per Vehicle[s]}=\frac{\text{Total_ stopped_ delay}}{veh_activos+veh_arrived}$ 110

Ecuación 30. $\text{Average_ number_ of_stops_per Vehicle}=\frac{\text{Total_ number_ of_stops}}{veh_activos+veh_arrived}$ 110

Ecuación 31. $\text{Average delay time per Vehicle[s]}=\frac{\text{Total delay time}}{veh_activos+veh_llegaron}$ 129

Ecuación 32. $\text{Average_ stopped_ delay per Vehicle[s]}=\frac{\text{Total_ stopped_ delay}}{veh_activos+veh_arrived}$ 129

Ecuación 33. $\text{Average_ number_ of_stops_per Vehicle}=\frac{\text{Total_ number_ of_stops}}{veh_activos+veh_arrived}$ 130

BIBLIOGRAFÍA

Adams. S. (2007). Evaluation of 3d Traffic Simulation Modeling Capabilities. Center for Transportation Training and Research. Texas Southern University, Tech. Rep.

Agosta, Roberto. y Papazian, Arturo. (2006). Operación y Control de Sistemas de Transporte.

Allsop, R. (1976). SIGCAP: A Computer Program for Assessing the Traffic Capacity of Signal-Controlled Road Junctions. Traffic Engineering & Control, vol. 17.

AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Acuerdo Metropolitano N° 042. (28, noviembre, 2007). Por el cual se adopta el Plan Maestro de Movilidad. Medellín. Colombia. 2007.

Ávila Medrano Álvaro. (2008). Elección de Rutas Alternas en un Escenario de Tráfico, por medio de la Simulación con Autómatas Celulares. Tesis Maestría en Ciencias de la Computación. Universidad Autónoma Metropolitana. Azcapotzalco. México.

Ayuntamiento de Madrid Instrucción de Vía Pública. (2000). Intersecciones Semaforizadas. Madrid, España.

Box, Paul. Oppenlander, Joseph. 1985. Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito. Asociación Mexicana de Ingeniería de Transportes A. C. México.

Cal y Mayor y Asociados, (2007). Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones. 8 Ed. México.

Castellanos, Yino. (2008). Agencia de Noticias de Ciencia y Tecnología de Colombia NOTICYT. Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia.

Chowdhury D. Pasupathy A. and Sinha S. (1998). Distributions of time and distance headways in the Nagel-Schreckenberg model of vehicular traffic: effects of hidrances. European Physical Journal B.

Cofre, Leandro. Salvati, Catalina. Suárez, Francisco. (2008). Modelado de Tránsito con Redes Petri. Proyecto final de la carrera de Lic. en Sistemas. Universidad FASTA Bariloche. España.

Daganzo, C. (1994). Requiem For Second - Order Fluid Approximations of Traffic Flow. Department of Civil Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley , EE.UU.

Day, I. (1998). Scoot Split Cycle Offset Optimization Technique. Siemenns, Austin, Texas. Estados Unidos EE.UU.

Fang. F and L. (2005). Some Guidelines for Selecting Microsimulation Models for Interchange Traffic Operational Analysis". Journal of Transportation Engineering. EEUU.

Gazis, D. (2002). Traffic Theory. Kluwer Academic Publishers. Bostón, Estados Unidos EE.UU. Gerencia General de Transporte Urbano (GGTU). Municipalidad de Callao, Perú.

Hall, R. (2003). Handbook of Transportation Science. Kluwer Academic Publishers.

Hunt, P. Bretherton, R. Robertson, D. and Royal, M. (1982). Scoot on Line Traffic Signal Optimization Technique. Traffic Engineering and Control.

López Secundino, García Marco, Hernández Pedro, Hernández Alejandro. (2000). Control Inteligente de Redes Urbanas de Tráfico. Centro de Inteligencia Artificial de la Ciudad de Oviedo. Gijón, España.

Ñañez, Pablo y Quijano, Nicanor. (2008). Forraje Social en Control de Tráfico Urbano. Revista Oficial de ITS Colombia Andina Traffic, N4, pp 55 – 60, Santafé de Bogotá, Colombia.

Osuna E. E., Newell G. F. (1972). Control Strategies for an Idealized Public Transportation System. Transportation Science 6.

Otárola Gustavo, Cortés Cristián E. y Sáez Doris. (2008).Control Predictivo Basado en Semáforos de Prioridad para Transporte Público. Departamento de Ingeniería Civil división Transporte, Universidad de Chile, Blanco Encalada, Santiago de Chile, Chile.

Papageorgiou, M. Ben-Akiva, M. Bottom, J. Bovy, P. Hoogendoorn, S. Hounsell, N. Kotsialos, A. and McDonald, M. (2007). ITS and Traffic Management. Handbooks in Operations Research and Management Science.

Papageorgiou, M. Diakaki, C. Dinopoulou V. Kotsialos, A. Wang, Y. (2003). Review of Road Traffic Control Strategies, Proceedings of the IEEE, Transactions on Intelligent Transportation Sustems.

PTV Planung Transport Verkehr AG. 2010. Manual de Vissim 5.30. Alemania.

PTV Planung Transport Verkehr AG. 2007. Manual de VAP 216. 2007. Alemania

Ramos, Manuel. (2000). Tesis Doctoral. Una Arquitectura para Sistemas Inteligentes Adaptativos Basada en el Modelo de Pizarra. Departamento de Tecnologías de las Comunicaciones ETSI. Universidad de Vigo.

Revista ANDINATRAFFIC. Determinación de los valores operacionales del control del tráfico urbano y sistemas de gestión dependientes de los niveles de adaptación de tráfico (Caso de Estudio Bogotá). Bogotá D.C. Octubre, 2008, N°4.

Road and Transportation Research Association Sterring commite Traffic Control and Traffic Safety. 2003. Guidelines for Traffic Signals Norma RILSA. Alemania.

Robertson, D. (1969). Transyt Method for Area Traffic Control. McTrans Center University of Florida, Florida, Estados Unidos EE.UU.

Robles. D. (2009). Control y Simulación del Tráfico Urbano en Colombia: Estado del Arte. Tesis para optar al título de ingeniero electrónico. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. Colombia.

Rodríguez Zamora, René. (2002). Modelación de Flujo de Tránsito de Autos Utilizando Autómatas Celulares. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Puebla. México.

Sáez, D. Cortés, C. Sáez, E. Riquelme, M. Núñez, A. Tirachini, A. (2008) Hybrid Predictive Control Strategy for a Public Transporation System with Uncertain Demand. En Procedings Special Issue Selected papers from the Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN).

SIGSET. (1971). SIGSET: A Computer Program for Calculating Traffic Signal Settings. Traffic Engineering and Control, vol. 12.

Suárez, Liliana. (2007). Análisis y Evaluación Operacional de Intersecciones Urbanas mediante Microsimulación. Trabajo de Investigación para optar el título de Magíster en Ingeniería Infraestructura y Sistema de Transporte. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. Colombia.